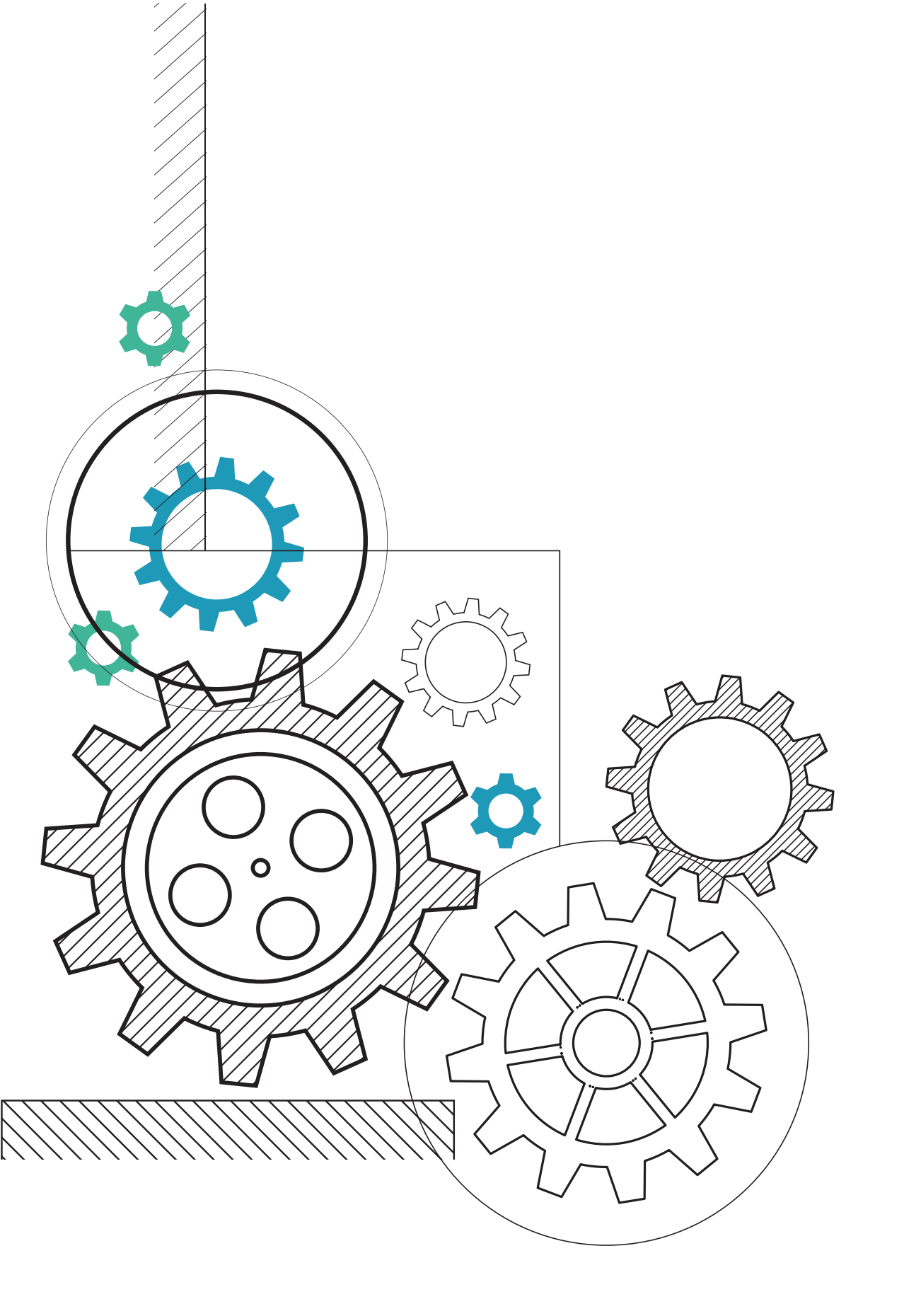




## **ФГАУ «НИИ «ЦЭПП»**

Федеральное Государственное Автономное Учреждение  
«Научно-Исследовательский Институт  
«Центр Экологической Промышленной Политики»


---





2.0

# ЭНЦИКЛОПЕДИЯ ТЕХНОЛОГИЙ



ТЕХНОЛОГИИ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ  
И ВОДООТВЕДЕНИЯ

Москва • Санкт-Петербург • 2023

УДК 628.1  
ББК 38.761.1  
368

Главный редактор  
доктор экономических наук *Д. О. Скобелев*

Рецензенты:

*Евгений Викторович Веницианов,*  
доктор физико-математических наук, профессор,  
заведующий лабораторией охраны вод Института водных проблем РАН,  
профессор кафедры экологии и управления водными ресурсами  
экологического факультета РУДН

*Валерий Самсонович Петросян,*  
доктор химических наук, профессор,  
заместитель генерального директора АО «РТ-Инвест»,  
профессор кафедры органической химии химического факультета  
МГУ им. М. В. Ломоносова, ректор Открытого экологического университета МГУ

**Энциклопедия технологий 2.0:** Технологии водоснабжения и водоотведения / [гл. ред. Д. О. Скобелев] ; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». — Москва ; Санкт-Петербург : Реноме, 2023. — 502 с. : ил.

ISBN 978-5-00125-822-3

Популярность первого издания «Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий» побудила авторов к написанию второй, пересмотренной и дополненной версии. В данном выпуске «Энциклопедии технологий 2.0» впервые рассмотрены процессы водоподготовки и водоотведения с точки зрения жизненного цикла воды и приведены сведения о затратах энергии и химических веществах, используемых при доставке воды потребителю и очистке сточных вод. Также в издании описан перспективный метод исследования термодинамической эффективности и экологических аспектов процессов водоподготовки и водоотведения, заключающийся в сравнении технологий между собой и/или с идеализированным аналогом, показаны подходы к определению степени эффективности процессов по материальному и термодинамическому балансу, по потребляемым веществам и энергии.

УДК 628.1  
ББК 38.761.1

ISBN 978-5-00125-822-3

© ФГАУ «НИИ «ЦЭПП», 2023  
© Авторы, 2023  
© Оформление. ООО «Реноме», 2023

*In vino veritas, in aqua sanitas*



Чистая вода — один из основных ресурсов человечества. Социологи и климатологи сходятся в том, что именно от запасов пресной воды зависит будущее цивилизации. Все мы неоднократно слышали, что человек на 70% состоит из воды и что каждому из нас следует выпивать примерно два литра воды в день. Именно поэтому так актуальны вопросы доступности пресной воды, ее природных запасов в той или иной местности и, конечно, качества, состава воды. Справедливости ради стоит отметить, что в природе нет идеальной воды: формула  $H_2O$ , которую мы все помним, даже близко не описывает все то разнообразие водных растворов, которое существует на нашей планете. Для большинства из нас чистая вода — это жидкость, которую можно пить, не опасаясь за свое здоровье; для химика чистая вода — это дистиллят и универсальный растворитель; для микробиолога — идеальная среда для размножения микроорганизмов.

Давно минули времена, когда чистую воду можно было просто набрать в ближайшей реке. В наши дни водоснабжение и водоотведение несомненно относятся к ключевым отраслям экономики любого государства. В томе «Энциклопедии технологий», который вы сейчас держите в руках, подробно описан ход эволюции технических решений, использовавшихся при организации процессов доставки воды потребителю и ее последующего отведения, от зарождения простейших водоводов до сложных современных станций подготовки питьевой воды и очистки сточных вод. Внимание уделено не только описанию текущего уровня развития технологий, но и прогнозу их дальнейшего совершенствования, включая аспекты цифровизации и расширения зон применения систем автоматического контроля. Эффективность новых технологических решений, соответствующих концепции наилучших доступных технологий, подтверждена как традиционными материальными балансами, так и с применением методов термодинамического анализа, в частности — эксергии. Такой подход для водохозяйственного комплекса применяется не часто, на сегодняшний день

---

просто не существует единого универсального метода очистки пресной воды. Это объясняется огромным разнообразием типов поверхностных и подземных вод, климатических зон, геологических и иных характеристик местности и учетом всех плюсов и минусов применения конкретных технологических решений на местах. Том «Технологии водоснабжения и водоотведения» будет полезен не только и не столько специалистам отрасли, но и студентам профильных высших и средних специальных учебных заведений, а также широкому кругу читателей, которым не безразличны новые экологически эффективные подходы к освоению ресурсов, как оказалось, вовсе не безграничных.

Следует отметить, что научные основы водообеспечения населения постоянно развиваются и, несмотря на то, что в книге представлены новейшие достижения в этой области знаний, в настоящее время ведутся работы и по изучению биологического значения молекулярно-кластерной структуры воды и воды как поставщика электронов для поддержания энергетического баланса. По мере осмысления результатов этих исследований и их практической апробации соответствующие дополнения к изложенным материалам будут представлены в дальнейшей работе в данном направлении.

*Юрий Анатольевич Рахманин,*  
академик Российской академии наук,  
академик Российской академии медицинских наук,  
доктор медицинских наук, профессор

*Уважаемые читатели!*

Книгой, которую вы раскрыли, продолжается серия томов второго издания «Энциклопедии технологий», получившего название «Энциклопедии 2.0». Этот том по сложившейся традиции представляет собой коллективную монографию и посвящен вопросам водоснабжения и водоотведения.



Вода — критически важный компонент биосферы планеты Земля, универсальный растворитель и колыбель жизни.

Наша страна чрезвычайно богата водными ресурсами, поэтому совершенно неудивительно, что при переходе России к новому государственному регулированию с применением концепции наилучших доступных технологий (НДТ) особое внимание органов власти и экспертного сообщества снискали технические, технологические и управленческие подходы в области транспортировки, обеззараживания, использования и очистки пресной воды.

В истекший с 2014 года период было создано и актуализировано более 50 информационно-технических справочников (ИТС) НДТ, которые в той или иной мере совпадали с областями применения НДТ других крупных мировых экономик: Европейского союза, Китайской Народной Республики, Республики Индия. Но были и отличия — впервые в мировой практике ведущими российскими специалистами был подготовлен ИТС НДТ, посвященный вопросам очистки коммунальных сточных вод, который получил не только признание внутри нашей страны, но и поддержку экспертов из стран Северной Европы и государств-участников БРИКС.

Разработчикам удалось собрать, структурировать и систематизировать колоссальный объем сведений о технологиях, технических возможностях их модернизации и готовности компаний и организаций инвестировать в развитие.

Любое нововведение требует времени и усилий. К слову сказать, понимание концепции НДТ и того, как ее применять для стимулирования экологической модернизации, все еще продолжает формироваться.

---

Подходы, содержащиеся в ИТС, периодически подвергаются критике; сама идея перехода к НДТ стала (в последнее время) активно переосмысливаться и подстраиваться под привычный контекст.

Более того, в процессе проводимого экспертного оценивания инвестиционных проектов и заявок на комплексные экологические разрешения (КЭР) неоднократно приходилось доказывать, что попытки изменять законы природы административными методами ведут к увеличению издержек промышленных предприятий и сдерживают развитие реального сектора экономики.

Поэтому пришлось взять паузу, представить описание проблемы с другого ракурса и создать научное обоснование того, как следует совершенствовать технологические показатели при актуализации ИТС. В конце 2019 года был утвержден текущий, уточненный вариант ИТС НДТ, а Правительство России утвердило перечень технологических показателей, которым теперь должны соответствовать объекты очистки коммунальных сточных вод нашей страны. Информационно-технический справочник по НДТ — документ довольно специфический, требующий для понимания хорошей отраслевой подготовки и в основном посвященный процессам очистки загрязненных сточных вод. А поскольку в Бюро НДТ информации было накоплено очень много, появилась идея создать «Энциклопедию технологий», которая бы описывала весь жизненный цикл пресной воды: от забора ее из источника до возвращения в водный объект очищенных сточных вод, а также в популярной форме рассказать о применяемых на каждом этапе технологиях. Когда стало понятно, что можно выделить и описать в едином формате общие черты, казалось бы, не похожих друг на друга технологий, было решено и в основу подачи материала в «Энциклопедии технологий» положить некую общую идею.

Любая технология — продукт человеческого разума. Она рождается либо в результате целенаправленного поиска, либо по воле случая. Для удовлетворения своих потребностей человек ищет способы получить что-то ему нужное из того, чем он располагает в достаточном количестве, — сырья, материалов и других ресурсов. Такое преобразование делается с использованием оборудования, которое называют основным, с помощью вспомогательных инструментов и механизмов. Весь процесс разворачивается во времени; также он распределен в пространстве. И в этом процессе обязательно, в той или иной степени, задействован человек. Принципиальное отличие технологии от природного процесса состоит в том, что при технологическом преобразовании сырья в конечный продукт всегда будет образовываться побочный, нежелательный результат. Это так называемые отходы и эмиссии, то есть выбросы в атмосферу и сбросы в водные объекты. Природные процессы отходов не образуют.

Чтобы найти общее в столь разнообразном, эволюцию решили попробовать описывать в рамках метафоры циклических явлений природы. Утро — День — Вечер — Ночь. Или Весна — Лето — Осень — Зима. Первый этап — *научно-технический*. Это утро (весна) технологии, первые реализации процесса. Основная задача на этом этапе — доказать техническую реализуемость «любой ценой». Пока вопрос экономической целесообразности явно не поставлен. Он будет



---

содержанием второго этапа — *технико-экономического*. День (лето) технологии наступает с такими технологическими усовершенствованиями, когда становится выгодным производить и реализовывать получившийся финальный продукт. Технология становится привлекательной для инвестирования. Наступает третий этап — *экономико-социальный*. Это начало заката — вечер (осень). Технология начинает активно масштабироваться и тиражироваться. Влияние нежелательного результата — отходов и различных эмиссий — начинает серьезно беспокоить общество. Активизируется гражданское общество. Оно инициирует четвертый этап — *социально-регуляторный*. Это ночь (зима) технологии. Вырабатываются регуляторные требования, устанавливаются ограничения и налагаются запреты. Инженерам и технологам необходимо сделать выбор: прекратить существование технологии, отправить ее в архив истории или ввести принципиальные усовершенствования и перевести технологию на этап экспериментов, опытно-промышленных испытаний новых решений, но на следующем витке спирали эволюции.

В предлагаемом вниманию читателей томе «Энциклопедии 2.0», посвященном обращению с водными ресурсами, в основу описания положен жизненный цикл круговорота воды в хозяйственном цикле: от источника до сброса.

Авторы предложили создать подход для определения степени зрелости, совершенства технологий водоподготовки и водоотведения, для чего постарались количественно оценить каждый из этапов эволюции с точки зрения ресурсной эффективности.

В процессе анализа и обобщения значительного массива данных удалось выработать подход к описанию технологий, создать единый формат представления, а также оценивания уровня развития и степени совершенства рассматриваемой технологии.

Мы по-прежнему пока еще далеки от мысли, что создано достаточное научное обоснование количественной оценки показателей НДТ при актуализации ИТС, но, по крайней мере, созданы методические подходы, которые могут быть использованы экспертами.

И конечно же, мы надеемся, что в этом томе читатели найдут для себя много полезного и интересного.

Руководитель Бюро НДТ  
*Дмитрий Олегович Скобелев*

## ВВЕДЕНИЕ

Российская Федерация принадлежит к числу государств, наиболее обеспеченных водными ресурсами. Среднегодовое возобновляемое водное ресурсное обеспечение России составляет 10 % мирового речного стока (второе место в мире после Бразилии) и оценивается в 4,3 тыс. км<sup>3</sup> в год. В целом по стране обеспеченность водными ресурсами составляет 30,2 тыс. м<sup>3</sup> на человека в год.

Россия, занимая шестую часть всей земной суши с протяженностью водного побережья 60 тыс. км, омывается водами 12 морей, принадлежащих бассейнам Северного Ледовитого, Тихого и Атлантического океанов, а также внутриматерикового Каспийского моря, отличается обилием природных вод, хорошо развитой речной сетью и системой озер. На территории России насчитывается свыше 2,5 млн больших и малых рек, более 2,7 млн озер, сотни тысяч болот и других объектов водного фонда<sup>1</sup>. В целом водой (без болот) занято 72,2 млн га, из них 27,4 млн га (38 %) включены в состав земель водного фонда, остальные земли под водой распределены между другими категориями. Большая их доля приходится на лесной фонд, земли сельскохозяйственного назначения и земли запаса. Общий объем статических водных ресурсов России оценивается приблизительно в 88,9 тыс. км<sup>3</sup> пресной воды, из них значительная часть сосредоточена в подземных водах, озерах и ледниках.

Водные ресурсы Российской Федерации в 2019 г. составили 4290,9 км<sup>3</sup>, превысив среднее многолетнее значение на 1,6 %. Большая часть этого объема — 4060,6 км<sup>3</sup> — сформировалась в пределах Российской Федерации, 230,3 км<sup>3</sup> воды поступило с территорий сопредельных государств. В указанные значения включаются подземные воды, дренируемые речными системами.

По состоянию на 1 января 2019 г. на территории страны разведано 18 067 месторождений (участков) подземных вод, из которых 12 209 находятся в эксплуатации. Общее количество оцененных запасов подземных вод, пригодных для хозяйственно-питьевого, производственно-технического и сельскохозяйственного водоснабжения, орошения земель и обводнения пастбищ, составляет

---

<sup>1</sup> Согласно п. 6 ст. 1 Водного кодекса Российской Федерации под водным фондом понимается совокупность водных объектов в пределах территории Российской Федерации. При этом водным объектом является природный или искусственный водоем, водоток либо иной объект, постоянное или временное сосредоточение вод, имеющие характерные формы и признаки водного режима.

82 119 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Прогнозные ресурсы подземных вод, по данным Государственного мониторинга состояния недр, оцениваются почти в 317 км<sup>3</sup>/год. При этом суммарные запасы всех подземных вод, значительная часть которых не связана с поверхностным стоком, составляют гораздо большую величину.

Однако при столь значительных водных ресурсах и использовании ежегодно в среднем не более 2% речного стока в целом ряде регионов существует дефицит воды, так как водные ресурсы Российской Федерации характеризуются существенной неравномерностью распределения по территории страны, а также очень большой их временной изменчивостью (особенно в южных районах) и высокой степенью загрязнения. Например, по величине местных водных ресурсов Южный и Дальневосточный федеральные округа различаются более чем в 10 раз.

Распределение прогнозных ресурсов подземных вод по территориям федеральных округов и субъектов Российской Федерации также неравномерное. Основная их часть (77,2% от общей величины) сосредоточена в четырех федеральных округах: Северо-Западном, Уральском, Сибирском и Дальневосточном, причем преобладающее количество — в Сибирском (28,9%); наименьшее — в Южном (2%).

На освоенные районы европейской части страны, где сосредоточено более 70% населения и производственного потенциала, приходится не более 10% водных ресурсов.

За последние годы водные проблемы существенно обострились в связи с антропогенными изменениями речного стока и бесхозяйственностью. В наиболее обжитых районах страны не осталось крупных рек, не нарушенных хозяйственной деятельностью, причем как на водосборах, так и в руслах самих рек. Существенное влияние на сток и качество воды оказали:

- агротехнические лесомелиоративные мероприятия;
- урбанизация, в результате которой сотни квадратных километров поверхности земли в каждом городе покрыты асфальтом;
- оросительная и осушительная мелиорация, охватившая сейчас миллионы гектаров;
- зарегулирование стока большим числом водохранилищ;
- значительные заборы воды на ирригацию, промышленное и коммунальное водоснабжение;
- сброс загрязненных вод в водосточники.

Анализ результатов многочисленных исследований, полученных за последние 15–20 лет как российскими, так и зарубежными учеными с использованием различных климатических сценариев и гидрологических моделей, убедительно показывает, что на подавляющей части России в первой половине XXI в. следует ожидать увеличения водных ресурсов и уменьшения их внутригодовой неравномерности. Согласно этим оценкам в большинстве регионов Российской Федерации можно ожидать увеличения годового стока рек на 10–15%.

Ресурсы подземных вод в нашей стране широко используются для различных хозяйственных целей. Этому способствуют большая равномерность их территориального распределения и чистота. Ресурсы подземных вод делятся

на естественные и эксплуатационные. В ряде промышленно развитых районов страны (Москва, Санкт-Петербург и др.) интенсивная эксплуатация подземных вод вызывает постоянное снижение их уровня (до 1 м в год). Воронки депрессии в зонах сосредоточенного водоотбора подземных вод развились уже на площади в сотни квадратных километров. В этих районах ухудшается качество подземных вод, отмечаются подсос морских вод к водозаборам, например в Крыму, просадки земной поверхности, активизируются карстовые процессы. Таким образом, назрела необходимость в мероприятиях по искусственному восполнению подземных вод и управлению их качеством и использованием во многих районах нашей страны.

В целом по России обеспеченность прогнозными ресурсами подземных вод составляет 6 м<sup>3</sup> в сутки на человека. При этом ряд субъектов РФ испытывает значительный дефицит воды, что обусловлено неравномерностью распределения ресурсов подземных вод. Слабо обеспечены кондиционными пресными подземными водами несколько крупных административных регионов России. Низкая естественная обеспеченность отдельных территорий ресурсами питьевых подземных вод объясняется рядом причин, основными из них являются:

- отсутствие водоносных структур или низкая водообильность водоносных горизонтов из-за особенностей строения геологического разреза, как, например, в районах многолетней мерзлоты (большая часть Восточной Сибири и Дальнего Востока);
- отсутствие подземных вод, соответствующих нормативным требованиям к питьевым водам по качеству (минерализации или содержанию отдельных нормируемых компонентов), что обусловлено климатическими или геохимическими особенностями формирования подземных вод (южные районы страны, районы с регионально развитыми зонами распространения соленосных пород и др.). В таких районах проводится специальная водоподготовка воды перед подачей ее потребителям.

Вместе с тем слабое освоение разведанных запасов подземных вод определяется следующими причинами:

- отсутствие современной нормативной базы с регламентами использования подземных водных объектов, учитывающей кардинальные изменения правовой и экономической ситуации в стране, неопределенность границ и статуса месторождений подземных вод;
- изменение юридического статуса территории месторождений;
- удаленное расположение месторождений от потребителей;
- изменение (ужесточение) требований к качеству питьевых вод;
- изменение водохозяйственной и экологической обстановки, в том числе застройка площади месторождений, их техногенное загрязнение;
- закрытие предприятий-водопотребителей и др.

Коммунальные службы традиционно отдают предпочтение поверхностным источникам водоснабжения. Как следствие около половины месторождений, разведанных в 50–80-е гг. прошлого столетия, в настоящее время не используется, хотя учитывается в государственном балансе.

### *Качество вод в водных источниках*

Основными факторами, определяющими гидрохимический режим поверхностных вод, являются климатические условия, геологическое и геоморфологическое строение территории, характер почв и растительного покрова, а также в значительной мере антропогенное воздействие неочищенных и загрязненных сточных вод многочисленных предприятий различной хозяйственной направленности. Сброс неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод — главная причина возникновения чрезвычайных экологических ситуаций, вызванных периодическим накоплением в одной среде большого набора загрязняющих веществ. По сбросам загрязняющих веществ, по их количеству и компонентному составу в каждом гидрографическом районе преобладают предприятия разных видов промышленности, чаще всего горнодобывающей, металлургической, металлообрабатывающей, целлюлозно-бумажной, химической, химико-биологической, фармацевтической, оборонной, предприятий энергетики, жилищно-коммунального хозяйства, сельскохозяйственных и др.

Поступление в водные объекты сточных вод большинства видов предприятий промышленного и коммунального хозяйства является одной из причин их загрязнения минеральными, биогенными и органическими веществами, многие из которых токсичны, а также эвтрофирования<sup>2</sup> отдельных водных объектов, в первую очередь водохранилищ. Современный уровень очистки сточных вод недостаточен. Существенное влияние на содержание биогенных, органических веществ и пестицидов оказывают стоки с сельскохозяйственных угодий, пастбищ, животноводческих ферм.

Качество подземных вод на территории России формируется под влиянием ряда природных и техногенных факторов. Часто сложно их отделить друг от друга, поскольку интенсивная хозяйственная деятельность нередко активизирует действие природных факторов, провоцирующих ухудшение качества подземных вод. Под воздействием техногенных факторов происходит интенсивное локальное изменение гидрохимического состояния подземных вод, что выражается в их загрязнении. В наибольшей степени подвержены загрязнению грунтовые воды и подземные воды первых от поверхности напорных горизонтов, составляющих зону активного водообмена. Применительно к подземным водам, являющимся элементом окружающей среды, понятие «загрязнение подземных вод» определяется следующим образом: это вызванное хозяйственной деятельностью изменение качества воды (физических, химических и биологических свойств) по сравнению с естественным состоянием и нормами качества воды по видам водопользования; такое изменение делает эту воду частично или полностью непригодной для использования по целевому назначению.

Особого внимания требуют вопросы качества и охраны подземных вод на централизованных водозаборах хозяйственно-питьевого назначения. В настоящее время эта проблема наиболее актуальна для крупных городов, где уровень

<sup>2</sup> Эвтрофикация — насыщение водоемов биогенными элементами, сопровождающееся ростом биологической продуктивности водных бассейнов.

техногенной нагрузки очень высокий и водозаборы работают в условиях постоянного риска. Интенсивный водоотбор приводит к подтягиванию некондиционных вод из смежных водоносных горизонтов и способствует ухудшению качества добываемой воды, в связи с чем отмечается рост сухого остатка и общей жесткости за счет повышения содержания хлоридов, сульфатов, натрия и магния.

В государственном докладе «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации» за 2018 г. суммарный расход загрязненных вод, добываемых для питьевого водоснабжения, оценивается в 5–6% от общего объема подземных вод, используемых для этих целей.

### *Забор и использование воды*

В Российской Федерации потребление воды в большей степени связано с непосредственным потреблением пресной воды. По данным Федерального агентства водных ресурсов общий объем забора воды из природных источников составил 68 298,54 млн м<sup>3</sup> в 2009 г., 75 400,00 млн м<sup>3</sup> в 2019 г. При этом забор пресной воды достиг 62 965,84 млн м<sup>3</sup>. В период 2010–2019 гг. данный показатель вырос на 13,05%.

Далеко не вся забранная из природных водных источников вода непосредственно используется на хозяйственных объектах, осуществивших водоизъятие. Имеет место забор воды в целях ее дальнейшего перераспределения с использованием каналов и водоводов, откачка из шахт и рудников в виде водоотлива и т. д. Доля водозабора для различных целей (включая морскую и некоторые другие непресные виды воды) от общего забора водных ресурсов из природных объектов имеет практически стабильный характер на уровне 87–89%.

В 2019 г. объем использованной пресной воды составил 51 163,48 млн м<sup>3</sup>. В течение 10 лет наблюдается относительно стабильное снижение данного показателя (за указанный период он сократился на 13,95%). В период с 2010 по 2019 г. наблюдалось общее снижение потребления воды. В 2012–2013 гг. особенно значительно сократилось потребление воды — на 4,5% в 2012 г. и на 6% в 2013 г. В 2014 г. было отмечено увеличение значения этого показателя на 4,5%; в 2015 г. показатель снизился на 2,6%; с 2016 по 2018 г. — снижение, но не столь заметное, — на 2,1% в 2017 г. и на 0,9% в 2018 г., с небольшим увеличением в 2016 г. на 0,2%, а в 2019 г. — резкое падение на 3,4%.

Забранная вода в основном расходуется на промышленные, питьевые и бытовые нужды, орошение и сельскохозяйственное водоснабжение. Ключевое направление использования свежей воды — промышленное водоснабжение (55,3% от забранной воды в 2019 г.). За 2010–2019 гг. произошло значительное снижение потребления воды в системах питьевого и бытового водоснабжения, а именно с 9587,43 до 7540,17 млн м<sup>3</sup>, или на 21,35%.

Снижение потребления воды на хозяйственно-питьевые нужды по сравнению с предшествующими годами было отмечено в 2010–2011 гг. В 2015 г. объем хозяйственно-питьевого водопотребления составил 8,2 млрд м<sup>3</sup> — это примерно на 0,3 млрд м<sup>3</sup>, или на 3,3%, меньше, чем в 2014 г. В 2017 г. данное сокращение оказалось на уровне 0,15 млрд м<sup>3</sup>, или на 1,9% ниже уровня 2016 г.; при этом объем использования воды на хозяйственно-питьевые нужды превысил 7,7 млрд м<sup>3</sup>.

В 2018 г. наблюдалось сохранение тенденции уменьшения рассматриваемого водопотребления: оно составляло 7,6 млрд м<sup>3</sup>, что примерно на 0,1 млрд м<sup>3</sup>, или на 1,3%, ниже, чем в предыдущем году. Таким образом, имеет место относительно устойчивое снижение хозяйственно-питьевого потребления воды: с 2010 по 2018 г. это уменьшение составило в целом почти 2,0 млрд м<sup>3</sup>, или примерно одну пятую часть.

### *Сброс сточных вод*

По данным Росводресурсов, объем сточных вод, сбрасываемых в природные поверхностные воды Российской Федерации, в 2019 г. составил 37 666,22 млн м<sup>3</sup>. За десятилетний период сокращение сброса произошло на 115 252,11 млн м<sup>3</sup>, или на 23,43% (сброс в 2009 г. — 47,7 км<sup>3</sup>). Динамика снижения показателя неравномерна: в начале рассматриваемого периода объемы сокращались на 5–6% в год, после 2014 г. среднегодовое снижение составляло около 2–3%, при этом после 2017 г. оно снова фиксируется каждый год примерно на уровне 5–6%.

Водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений занимают второе место по объему сброса сточных вод: в 2019 г. данный показатель был равен 9271,53 млн м<sup>3</sup>, в 2018 г. — 9403,43 млн м<sup>3</sup>, что больше на 1,4%, в 2009 г. показатель был равен 8817,23 млн м<sup>3</sup> (включая производство и распределение электроэнергии, газа). Этот показатель составляет 23,5% от общего объема сброса сточных вод в Российской Федерации.

В структуре общего показателя сброса сточных вод по Российской Федерации в 2019 г. наибольшую долю занимала нормативно чистая вода — 22,88 млрд м<sup>3</sup> (2010 г. — 30,8 млрд м<sup>3</sup>). Объем загрязненных сточных вод составил 12,60 млрд м<sup>3</sup> (в 2010 г. — 16,5 млрд м<sup>3</sup>); из этого количества 2,31 млрд м<sup>3</sup> было сброшено без очистки. Остальной объем сброса приходится на недостаточно очищенные загрязненные сточные воды (в 2010 г. — 3,2 млрд м<sup>3</sup>). Сброс очищенных сточных вод в 2019 г. составил всего 2,18 млрд м<sup>3</sup> (в 2010 г. — 1,88 млрд м<sup>3</sup>). За период 2010–2019 гг. структура всей сточной воды практически не изменилась.

На сокращение объема сброса загрязненных сточных вод положительно повлияли строительство и ввод в эксплуатацию очистных сооружений и установка, реализация технических и производственных мер, которые одновременно способствовали экономии пресной воды.

За период 2010–2019 гг. объем нормативно очищенных сточных вод увеличился незначительно — с 1878 млн м<sup>3</sup> в 2010 г. до 2184,34 млн м<sup>3</sup> в 2019 г., или почти на 16,31%. Кроме того, динамика значений показателя в течение данного периода носила главным образом изменчивый характер.

Одна из основных причин приведенной, во многом колебательной, тенденции — перевод нормативно очищенных вод в другие категории стоков, прежде всего в состав загрязненных (недостаточно очищенных) сточных вод. Это происходило во многих случаях из-за перегрузки водоочистных сооружений, их некачественной работы, нарушений технических регламентов, нехватки реагентов, прорывов и залповых сбросов. Однако существовало и продолжает сохраняться воздействие ряда иных факторов, идентифицировать которые

бывает достаточно сложно. Среди них одно из ведущих мест занимает позиция водоохраных органов, которые в принципе должны контролировать перевод стоков предприятий-водопользователей, коммунальных канализаций и других из одной категории в другую.

Под воздействием техногенных факторов происходит локальное изменение гидрохимического состояния подземных вод, выражающееся в их загрязнении. В наибольшей степени загрязнению подвержены грунтовые воды и напорные воды первых от поверхности водоносных горизонтов, имеющие тесную гидравлическую связь с поверхностными водами.

На территории Российской Федерации, по данным государственного мониторинга состояния недр, выявлено 5202 участка загрязнения подземных вод, в том числе 2992 участка связаны с загрязнением подземных вод на водозаборах питьевого и хозяйственно-бытового назначения, преимущественно представляющих собой одиночные эксплуатационные скважины с производительностью менее 1,0 тыс. м<sup>3</sup>/сут. По экспертным оценкам в целом по Российской Федерации доля загрязненных вод составляет 5–6 % общего объема их использования для питьевого водоснабжения населения.

Особенно сильное загрязнение подземных вод наблюдается вблизи приемников промышленных, коммунальных и сельскохозяйственных отходов. Формирующиеся здесь участки загрязнения подземных вод хотя и имеют локальный характер распространения, но отличаются высокой интенсивностью загрязнения. Практически повсеместно загрязнение проявляется в районах промышленных и городских агломераций.

Особого внимания требуют вопросы качества и охраны подземных вод на централизованных водозаборах питьевого и хозяйственно-бытового назначения. В настоящее время эта проблема наиболее актуальна для крупных городов, где уровень техногенной нагрузки очень высокий и водозаборы работают в условиях постоянного риска. Изучение загрязнения подземных вод проводится как непосредственно на участке водозабора, так и на прилегающей к нему территории, особенно по пути возможного поступления загрязненных вод.

На крупных водозаборах подземных вод, находящихся в ведении жилищно-коммунального хозяйства городов, как правило, организованы зоны санитарной охраны, в пределах которых в основном соблюдаются требования СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого водоснабжения». На малых водозаборах в ряде случаев зоны санитарной охраны либо вообще не созданы, либо хозяйственная деятельность в пределах таких зон не соответствует требованиям указанного нормативного документа.

Особенно часто отсутствие зон санитарной охраны наблюдается на водозаборах, сооруженных на участках с неоцененными запасами подземных вод. В результате отсутствия зон санитарной охраны на таких водозаборах нередко происходит загрязнение подземных вод.

Неблагоприятной остается обстановка с ликвидацией бездействующих скважин. Бесхозные скважины являются источниками загрязнения подземных вод, так как их устья, как правило, открыты, павильоны разрушены, тампонаж приустевых площадок нарушен или совсем отсутствует.



## ВОДОСНАБЖЕНИЕ

### **Георгий Александрович Самбурский**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»,  
Департамент водоподготовки  
Российской ассоциации водоснабжения и водоотведения,  
доктор технических наук

### **Татьяна Михайловна Портнова**

Филиал «Водоснабжение Санкт-Петербурга»  
Государственного унитарного предприятия  
«Водоканал Санкт-Петербурга»

### **Юлиана Николаевна Бурвикова**

Федеральное государственное автономное учреждение  
«Научно-исследовательский институт  
«Центр экологической промышленной политики»,  
кандидат химических наук

---



## ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ

Водоснабжение как отрасль экономики и непосредственно водопроводное хозяйство практически являются ровесником человеческих цивилизаций.

Вся жизнь первобытных племен проходила вблизи воды, если вода в источнике иссякала, то племя искало новый водоем и переселялось туда в надежде получить все необходимое для жизни.

Новая, более значимая, роль воды возникла при переходе от присваивающего типа хозяйства к производящему, когда зарождается специализация районов и возникает торговля. Этот период стал важной поворотной точкой в истории человечества.

### *Древний мир*

Первые цивилизации древнего мира формировались в долинах рек: китайская — в долине реки Хуанхэ, индийская — Инд, древнеегипетская — Нил. История их становления связана с освоением водных ресурсов. Часто эти цивилизации называют «речными»<sup>1</sup>. Первые ирригационные системы возникли в VIII тыс. до н. э. (примерно 10 тыс. лет назад) вместе с так называемыми протогородами, вокруг которых начиналось орошение почв, возникали системы каналов, плотин и дамб.

В Древнем Египте для подъема воды из колодцев и перекачивания ее из одного водоема в другой применялся шадуф — вращающийся в двух плоскостях рычаг, к одному концу которого было прикреплено ведро. Позднее в том же Египте было изобретено сакиэ — деревянное колесо с прикрепленными к нему сосудами, с помощью которых вода непрерывно поднималась из водоема на достаточно высокий уровень<sup>2</sup>. Пожалуй, самым монументальным сооружением водоснабжения в Египте был колодец глубиной 100 м с огромной цистерной для хранения воды, сооружение располагалось в пустыне по дороге в Нубию и датируется 1282 г. до н. э. (правление Рамзеса II).

На территории Индии поливное земледелие зародилось немного позже, чем в Египте, примерно в VII тыс. до н. э. Древнеиндийская цивилизация была источником знаний, которые распространялись в соседние регионы.

<sup>1</sup> Бойко В. П. и др. Очерки истории водоснабжения и водоотведения (теоретический, практический и социокультурный аспекты) / под ред. В. П. Бойко. — Томск : Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2014.

<sup>2</sup> Линд Г. Вода и город. — М. : Гидрометеиздат, 1984.

Так, гидротехнические сооружения, обнаруженные археологами в Междуречье Тигра и Евфрата, практически копируют индийские. Примером таких технологий может служить создание фундамента с помощью отпускного колодца; в Европе аналогичные технологии стали применяться только с середины XIX в. Благодаря возведению плотин засушливые земли превращались в плодородные, росла производительность труда, а соответственно, появлялись возможности кормить большую массу людей, не занятых в сельском хозяйстве. Развитие технологий, применяемых для орошения земель, привело к тому, что на рубеже III и II тыс. до н. э. в долине реки Инд существовало несколько крупных городов, главные из которых — Мохенджо-Даро, Хараппа, Чанху-Даро и Калибаган<sup>3</sup>. Система водоснабжения в индийских протогородах состояла из множества выложенных кирпичом колодцев, глубиной от 0,6 до 2,0 м и более, которые были во всех крупных домах и находились в специальных помещениях. Тогда же появились первые общественные бассейны. При проведении раскопок на центральной улице одного из протогородов Индии археологи обнаружили бассейн размером 12 на 7 м, в который можно было спуститься с обоих концов по лестнице, облицованной деревом. Бассейн был оборудован стоком — квадратным отверстием и желобом; чтобы вода не просачивалась, над кирпичной облицовкой бассейна располагался слой битума, а за ним — толстая глиняная прокладка между двумя кирпичными стенами. Одну из больших построек рядом с бассейном идентифицировали как баню, нагревавшуюся горячим воздухом.

В Китае основной земледельческой культурой был (и остается) рис. Возделывание риса ставило перед общиной задачи, связанные с орошением полей, а также с предохранением их от затопления. Последнее было особенно важно, т. к. рис сеялся на низких и заболоченных участках, ближе к реке, воды которой легко размывали лессовые берега и уничтожали посевы. В эпосе Китая создание первых оросительных каналов и дамб приписывается мифическому императору Юю, который и обучил людей их строительству. Задолго до нашей эры в Китае проводились различные гидротехнические работы, в том числе создавались целые сети дренажных каналов, были изобретены первые простые водоподъемные машины, представляющие собой водочерпальные колеса, сделанные из бамбука. Подобные системы устанавливали на реках, и они работали за счет энергии потока речной воды. Более сложным изобретением стал первый водоподъемный насос, который состоял из замкнутой цепи с прикрепленными к ней квадратными лопастями. Насос приводился в движение людьми или животными. При движении цепи с лопастями вода подавалась по вертикальному желобу на высоту до 5 м. Широко использовали китайские инженеры подземные галереи (кирязы), с помощью которых с предгорных районов питьевая вода подавалась в города и для орошения в сельскую местность. Благодаря орошению китайцы получали с полей до трех урожаев в год, что заложило основы китайской цивилизации.

<sup>3</sup> Альбедиль М. Ф. Забытая цивилизация в долине Инда. — СПб. : Наука, 1991.

Многие из каналов, построенных в Китае более 2 тыс. лет назад, действуют до сих пор.

Говоря о Древнем Востоке, невозможно не упомянуть государство Месопотамию, где последовательно сменились несколько царств: Шумер, Аккад, Ассирия и Вавилон<sup>4</sup>.

В VI–V тыс. до н. э. в Южной Месопотамии существовала система каналов, плотин и дамб и сложная система орошения возделываемых земель. Долина реки Евфрат в целом расположена на более высоком уровне, чем долина реки Тигр. Это создает возможность переброски воды из одной реки в другую по сети каналов для орошения полей.

Шедевром систем водоснабжения Древнего мира являются знаменитые сады Семирамиды. Разбитые по приказу вавилонского царя Навуходоносора II (605–562 гг. до н. э.) на крыше одного из дворцов на специально созданных платформах сады орошались при помощи водоподъемных механизмов. Считается, что платформы террас были сложены из каменных плит, покрытых слоем камыша, залитого асфальтом, затем шел ряд кирпичей, скрепленных гипсом, далее — свинцовые плиты, не пропускавшие воду в нижние этажи сада. Все это сложное сооружение было покрыто толстым слоем плодородной земли, в которой могли пускать корни даже самые большие деревья. Ярусы поднимались уступами и соединялись широкими пологими лестницами. Высота ярусов достигала почти 28 м. Вода из Евфрата подавалась с помощью водочерпальных колес (сакиэ) и кожаных ведер (черд), скользивших по канату. Система приводилась в действие тягловыми животными.

На рубеже II и I тыс. до н. э. в Северной Месопотамии усилилось государство Ассирия. Столица Ассирии — Ниневия, построенная на берегу реки Тигр, занимала площадь в 728 га, там проживало 170 тыс. человек, это был один из крупнейших мегаполисов Древнего мира. Для того чтобы столица и находившийся рядом с ней царский дворец в Хорсабаде получали воду хорошего качества (с гор), ассирийский царь Синахериб приказал возвести плотину на реке Хоср (приток реки Тигр) и канал длиной 16 км, по которому вода подавалась в столицу, этой же водой питались сады в 17 селениях рядом с Ниневией. Самый крупный канал, носивший имя Синахериба, имел длину 54 км. Дно и стены канала были облицованы плитами известняка; все сооружения, включая несколько акведуков из камня с арочными пролетами, были построены за 13 лет.

### *Античность*

Древняя Греция не может гордиться крупномасштабными проектами в области орошения больших территорий, строительства грандиозных каналов и других гидросооружений.

Говоря о Древней Греции, невозможно не вспомнить великого математика, механика, астронома Архимеда (около 287–212 до н. э.). Ученый

<sup>4</sup> Очерки истории Древнего Востока / под ред. В. В. Струве. — Л., 1956.

сделал множество теоретических открытий, но в приложении к процессу водоснабжения нас более всего интересует установленный им факт, что на всякое тело, погруженное в воду, действует выталкивающая сила и значение этой силы равняется весу вытесненной этим телом воды. Этот закон является одним из основных в физике и назван законом Архимеда. Из прикладных открытий отметим изобретенные Архимедом водяные часы и винтовой насос.

В VI в. до н. э. в Греции начались работы по строительству канала, пересекавшего Коринфский перешеек. В этот же период был сооружен водопровод в Афинах, а век спустя — в Сиракузах. Население Афин тогда достигало 200 тыс. человек. Чтобы обеспечить мегаполис водой, было построено 20 водопроводов, представлявших собой неглубокие открытые каналы. Для подвода воды к домам применялись трубы из свинца, бронзы, камня и керамики. Стыки труб герметизировали свинцом или известковым раствором. На трассе трубопроводов применялись дюкеры и сифоны. К изобретениям Древней Греции относят гидравлические устройства, с помощью которых учитывались время и расход протекающей жидкости (клепсидры), а также пожарный нагнетательный двухцилиндровый поршневой насос (это изобретение принято приписывать математику и механику Ктесибиию).

В начале III в. до н. э. в Средиземноморье в экономическом и культурном плане Греция главенствовала, но в это же время начал возвышаться Рим. Именно от греков римляне получили способность к теоретизированию, обобщению мирового опыта и использованию его в своей практике. В этом отношении выделяется творчество Марка Витрувия Поллиона, который за 15 лет до н. э. написал замечательный труд «Десять книг об архитектуре». Кроме архитектурных проектов Витрувий вслед за Архимедом дает описание водоподъемных устройств, насосов, водяной мельницы, городского водопровода, устройства акведуков и других деталей римского водоканала. Он рекомендует три вида водопроводов: проводка по каналу, по свинцовым трубам и по глиняным (керамическим) трубам.

По схеме, предложенной Витрувием, вода по каналу попадала из реки в специальный водоем, построенный внутри города. Из этого водоема она поступала в три специально построенных для этого резервуара. Из одного она поступала в общественные бани (термы), из другого — в фонтаны и городские пруды, из третьего — в жилые здания. Витрувий предлагал через каждые 7 км на водоводах ставить водонапорные башни, устанавливая вантузы и устраивать на водопроводной сети смотровые колодцы через каждые 75 м. Древние римляне знали о гидравлическом ударе, поэтому Витрувий рекомендовал на сети устанавливать уравнивательные резервуары для гашения гидравлического удара. Свинцовые и гончарные трубы он рекомендовал делать с запасом прочности толщиной не менее 35 мм и заключать их в каменные или бетонные футляры. Стыки труб заполнялись негашеной известью, смешанной с оливковым маслом, отводы выполнялись из просверленного камня. Перед пуском в эксплуатацию для герметизации рекомендовалось засыпать в трубы пепел,

чтобы им забивались недостаточно замазанные стыки. Указывал ученый и минимальный уклон водопровода — 0,0025.

Первый римский водопровод был сооружен в 312 г. до н. э. в цензуру Аппия Клавдия Слепца, почему и получил название Аппиев. После победы над эфирским царем Пирром в Риме стали строить второй водопровод, который был готов к 272 г. до н. э. и получил название Старого Анио по названию реки, питавшей его. Оба водопровода исправно служили около 100 лет, но постепенно пришли в ветхость, и в 144 г. до н. э. после победного разрушения Карфагена и покорения Греции было начато строительство нового водовода. Сенат поручил претору Марцию заняться его строительством, и в результате этот водопровод получил его имя. Это был лучший водопровод Рима<sup>5</sup> как по качеству строительства, так по вкусу и свежести воды, поступающей по нему. Последний водопровод времен республики был сооружен в 125 г. до н. э. цензором Гнеем Сервилием Ципионом и получил название Теплого, вероятно, из-за высокой температуры поступающей в Рим воды. Из водопроводов периода империи следует выделить грандиозное сооружение, начатое императором Калигулой в 38 г. н. э. и законченное в 52 г. н. э. императором Клавдием. Общее число водопроводов к концу периода империи доходило до 11. Их масштабы росли и поражают воображение: длина Аппиева водопровода равнялась 16,6 км, Старого Анио — 63,7 км, Марциева — 91,33 км, Клавдиева и Нового Анио вместе — 158 км. В Риме в 310 г. н. э. насчитывалось 15 больших терм и 256 общественных терм-купален. В термах находились банные залы, располагались развлекательные и спортивные заведения, клубы по интересам, библиотеки, дискуссионные залы, торговые предприятия, сады.

### *Средневековая Западная Европа*

Раннее средневековье — это постепенный регресс по сравнению с античностью, однако и здесь были свои изобретения, например водяная мельница. Разумеется, это было только усовершенствование того механизма, о котором писал в своих трудах Витрувий, но в то время горизонтальную ось колеса совместили с вертикальной — жерновов.

В средневековой Европе господствовала антисанитария, вытеснившая античные представления о связи чистоты (как личной, так и городов) и здоровья. Климат Европы, более влажный по сравнению с регионами Азии и Африки, не требовал создания сложных систем для орошения, но земледелие было и не столь продуктивным, как на юге; гораздо легче было заниматься скотоводством. Тем не менее для развития городов важно было иметь доступ к энергии текучих вод, которые давали возможность частично механизировать трудоемкие процессы. Примерами такого рода могут служить Париж и Венеция.

<sup>5</sup> Кнаббе Г. С. Древний Рим — история и повседневность. — М. : Искусство, 1986.

Деревня Лютеция (будущий Париж) располагалась на острове посередине реки Сены<sup>6</sup> и была территорией галльского племени паризиев. Будучи отличной локацией на пути из Средиземноморья в северные части Европы, в 497 г. деревня подпала под власть франкского короля Хлодвига, который сделал Лютецию (или Паризий) своей резиденцией. Долгое время в Париже главным источником воды вплоть до 1760 г. была Сена. Воду в дома состоятельных горожан ведрами доставляли специальные водоносы. Уже в те времена вода Сены была заиленной и «густой», соответственно, лучше держала лодки, но не слишком годилась для питья, так как в реку сбрасывались всевозможные отходы уже довольно крупного города. Колодцы Парижа также ничем не были защищены от попадавших в грунтовые воды нечистот и давали воду не лучшего качества.

Ярким примером города, расположенного на воде, но на воде, не пригодной для питья, является Венеция<sup>7</sup>. Одним из слабых мест Венеции было именно снабжение населения пресной водой. Колодцы на площадях и во дворах дворцов были не выкопаны, а представляли собой резервуары, до половины наполненные мелким песком, через который фильтруется и осветляется дождевая вода. Затем эта вода собиралась самотеком в колодец, пронизывающий резервуар посередине. Если дождя не бывало несколько недель, резервуары высыхали, а если море штормило, то в колодцы через водосборники попадала соленая вода. Разумеется, для нужд города такого количества воды было недостаточно, и вода подвозилась на барках — небольших транспортных судах без киля.

Подобное положение, когда воду доставляли водным путем, наблюдалось и в голландских городах, располагавших только резервуарами для сбора дождевой воды, мелкими колодцами и сомнительной чистоты водою каналов.

Одной из неразрешимых проблем всех средневековых городов было ограждение источников питьевой воды от загрязнения их фекалиями; например, в Вене в XIII в. питьевые фонтаны во дворах домов находились на расстоянии не более 1 м от отхожего места, и так обстояло дело практически во всех городах.

### *Русь (Россия)*

Водоснабжение Руси (как и Европы) изначально связано с использованием достаточно полноводных рек, а также устройства колодцев, при этом водопроводные системы тоже встречались.

Из-за высокой влажности почвы погребов в Новгороде не устраивали (весной их заливало водой), а в колодцы просачивалась вода из наземных источников. Воду новгородцы брали из ключей или реки Волхов, существовал и новгородский водопровод, составленный из деревянных полых стволов диаметром от 0,2 до 0,3 м, подававший воду самотеком из загородных ключей в княжеский дворец. Здесь же были обнаружены древние дренажные каналы XII в. высотой

---

<sup>6</sup> Бродель Ф. Структуры повседневности: возможное и невозможное ; пер. с фр. Т. 1. Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV–XVIII вв. — М. : Прогресс, 1986.

<sup>7</sup> Бойко В. П. и др. Очерки истории водоснабжения и водоотведения...



в четыре бревна (около 60 см), плотно подогнанных друг к другу, закрытые обтесанными досками и прикрытые сверху берестой. Канал для отвода сточных вод высотой 0,5 м и шириной 0,6 м датируется XIV в., был сделан он из тесаных досок, скрепленных между собой деревянными шпилками<sup>8</sup>.

В других городах Древней Руси воду чаще всего брали из колодцев. На юге страны колодцы строились по скифской технологии: глубина — 10–11 м, диаметр по дну — 3,5 м, а в верхней части — до 7 м. Сверху колодец крест-накрест перекрывался деревянными балками, с которых с помощью ведра и веревки поднималась вода. Немного позже появились простейшие блоки и ворота. Иногда устраивались глубокие колодцы (примерно с XVI в.), трубы для которых изготавливались из стволов деревьев с помощью специальных сверлильных механизмов. Надежным водоснабжением на Руси оснащались и города-крепости. Колодцы рыли внутри городских стен, вокруг крепости сооружали водяные рвы и оборудовали тайники, т. е. хорошо замаскированные выходы к воде за крепостными стенами. Длина таких тайников достигала 200 м.

Частью садово-паркового ландшафта вода в России стала во времена правления Петра I, летняя резиденция которого (Петергоф) была не только архитектурным ансамблем, но и сложнейшим гидротехническим сооружением. Центром комплекса является Большой дворец, построенный на возвышенности, к которому от моря прорыт канал с разбитым на его берегах Нижним парком с фонтанами и небольшими дворцами. Чтобы создать дополнительное давление в фонтанах, был построен еще один канал длиной 20 км со шлюзом, подводящий воду к накопительным прудам на верхней площадке у Большого дворца. Петергофские фонтаны начали действовать 20 (9) августа 1721 г. Самым мощным стал фонтан «Самсон» (символ победы России в Полтавской битве), в котором струя воды была на высоту 19,5 м. Всего в Петергофе насчитывалось 76 фонтанов, суммарный расход воды в которых достигал 3,1 м<sup>3</sup>/с. По продолжительности действия петергофские фонтаны превосходили время действия фонтанов знаменитого Версаля. Регулирующая емкость воды в Верхних прудах в Петергофе достигала 131 тыс. м<sup>3</sup> и имела форму бассейна длиной 640 м, шириной 32 м, глубиной 6,4 м.

До XIX столетия жители Москвы пользовались водой из открытых бассейнов рек, прудов, а также колодезной водой. Первый централизованный водопровод в Москве начал строиться в 1779 г. по личному указу Екатерины II, высочайший приказ гласил: «Генералу Порутчику Бауру произвести в действо водяные работы для пользы престольного нашего города Москвы» (рис. 1). Источником водоснабжения служили подрусловые воды реки Яузы (село Большие Мытищи). Для перехода через реку Яузу у села Ростокино был построен каменный акведук длиной 356 м, который сохранился до наших дней. Работы длились 25 лет. Открытие водопровода состоялось 28 октября 1804 г., уже при Александре I, именно в этот день в первопрестольную ежедневно начала поступать чистая вода из мытищинских ключей.

<sup>8</sup> Янин В. Л. Я послал тебе бересту. — 3-е изд., доп и испр. — М., 1998.

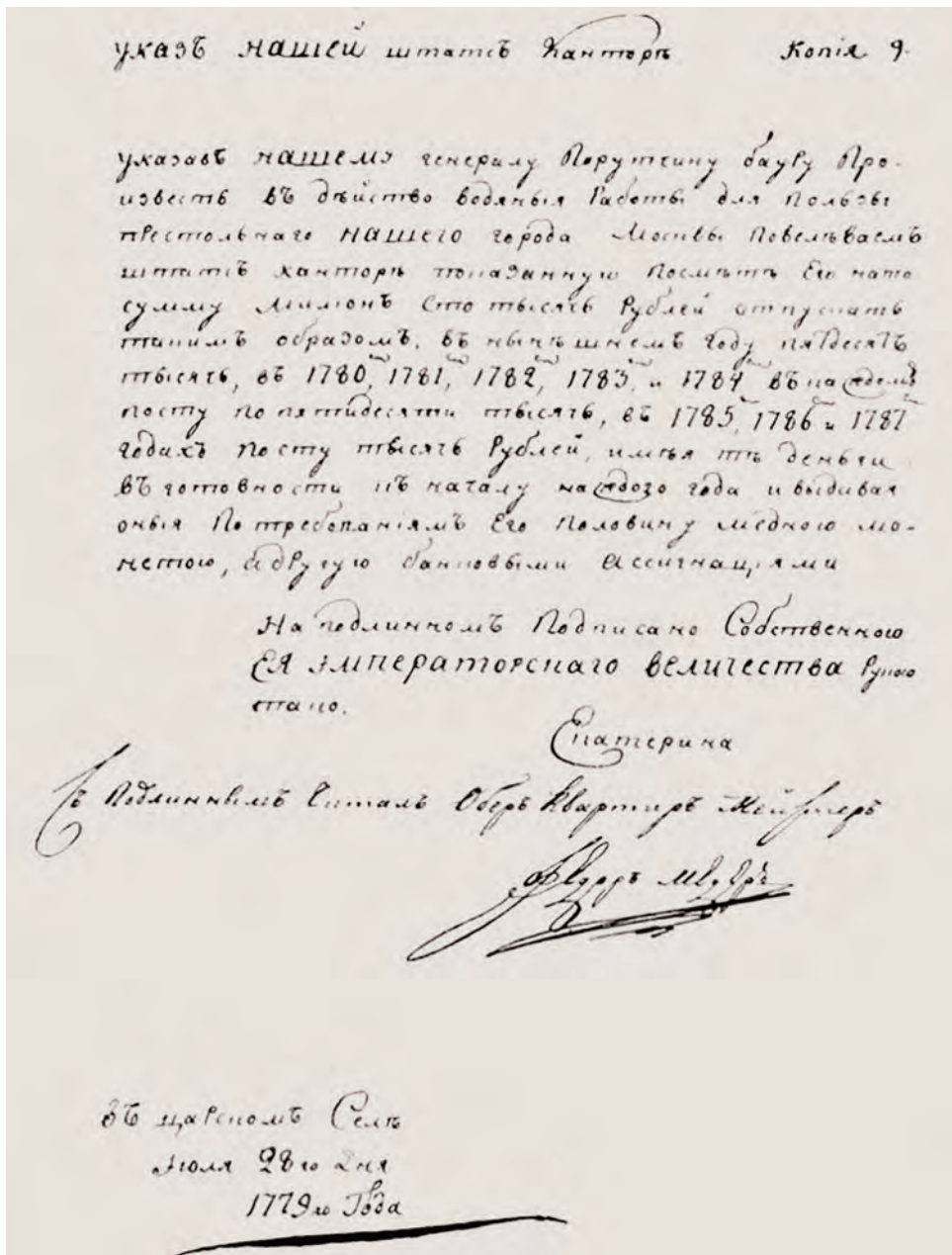


Рис. 1. Копия Указа Екатерины II о создании московского водопровода

Вот как описывает это событие современник: «Сие общепольное дело, начатое великою Екатериною, наконец, совершено Александром, и вода, свежая здоровая уже поит всех жителей московских, имевших в ней всегдашний недостаток... Сия вода, чистая и прозрачная, эта первая после воздуха

потребность жизни проведена в столицу из мытищинских колодцев. Неужды — ...прославляйте вместе с нами золотые времена сии усердно, искренно, нелицемерно»<sup>9</sup>.

Центром притяжения горожан стали водоразборные фонтаны. Владимир Гиляровский в своей книге «Москва и москвичи»<sup>10</sup> так описывает жизнь вокруг фонтана: «Лубянская площадь — один из центров города. Против дома Мосолова (на углу Большой Лубянки) была биржа наемных экипажей... Из трактира выбежали извозчики — в расстегнутых синих халатах, с ведром в руке — к фонтану, платили копейку сторожу, черпали грязными ведрами воду и поили лошадей. Набрасывались на прохожих с предложением услуг, каждый хваля свою лошадь, величая каждого, судя по одежде, — кого “ваше степенство”, кого “ваше здорье”, кого “ваше благородие”, а кого “вась-сиясь!”. Шум, гам, ругань сливались в общий гул, покрываясь раскатами грома от проезжающих по бульжной мостовой площади экипажей, телег, ломовых полков и водовозных бочек. Водовозы вереницами ожидали своей очереди, окружив фонтан, и, взмахивая черпаками-ведрами на длинных шестах над бронзовыми фигурами скульптора Витали, черпали воду, наливая свои бочки».

Одним из старейших фонтанов Москвы является Петровский (Театральная площадь, бывшая Петровская площадь), это один из пяти водоразборных фонтанов, которые оборудовали в Москве в 1826–1835 гг. (рис. 2). Первоначально фонтан имел исключительно утилитарную функцию — ежедневно он поставлял жителям столицы примерно 17 тыс. ведер воды.

Через несколько лет после постройки фонтану решено было придать еще и художественное оформление. Основную чашу фонтана поместили на постамент, а верхнюю — расположили на колонне, которую поддерживают четыре бронзовых амура. Их фигурки олицетворяют грани театрального искусства: трагедию, комедию, поэзию и музыку. Утилитарных свойств при этом фонтан не утратил.

В течение XIX в. положение в столичных городах с водоснабжением и водоотведением коренным образом изменилось. Если в начале века горожане активно пользовались услугами водовозов, то в конце века уже использовался водопровод.

В Петербурге пробный пуск водопровода в центральной части города был осуществлен в 1863 г. Длина водопроводной сети составила 186 верст (порядка 200 км), мощность водопровода — 1,5 млн ведер воды в сутки (одно ведро — 12,3 л). Уже к концу XIX в. водопровод стал достоянием не только двух столиц, но и атрибутом жизни крупных губернских и промышленно развитых городов.

В таблице 1 приведены основные исторические вехи развития водоснабжения как отрасли, а в таблице 2 — основные этапы развития водного хозяйства Москвы и Ленинграда в советский период.

<sup>9</sup> Как снабжалась водой Москва до Указа Екатерины II о строительстве централизованного общественного водопровода? // Официальный сайт Мосводоканала. — URL: <https://www.mosvodokanal.ru/about/history/215-years/8902/> (дата обращения 25.10.2023).

<sup>10</sup> Гиляровский В. А. Москва и москвичи. — М. : АСТ, 2018.

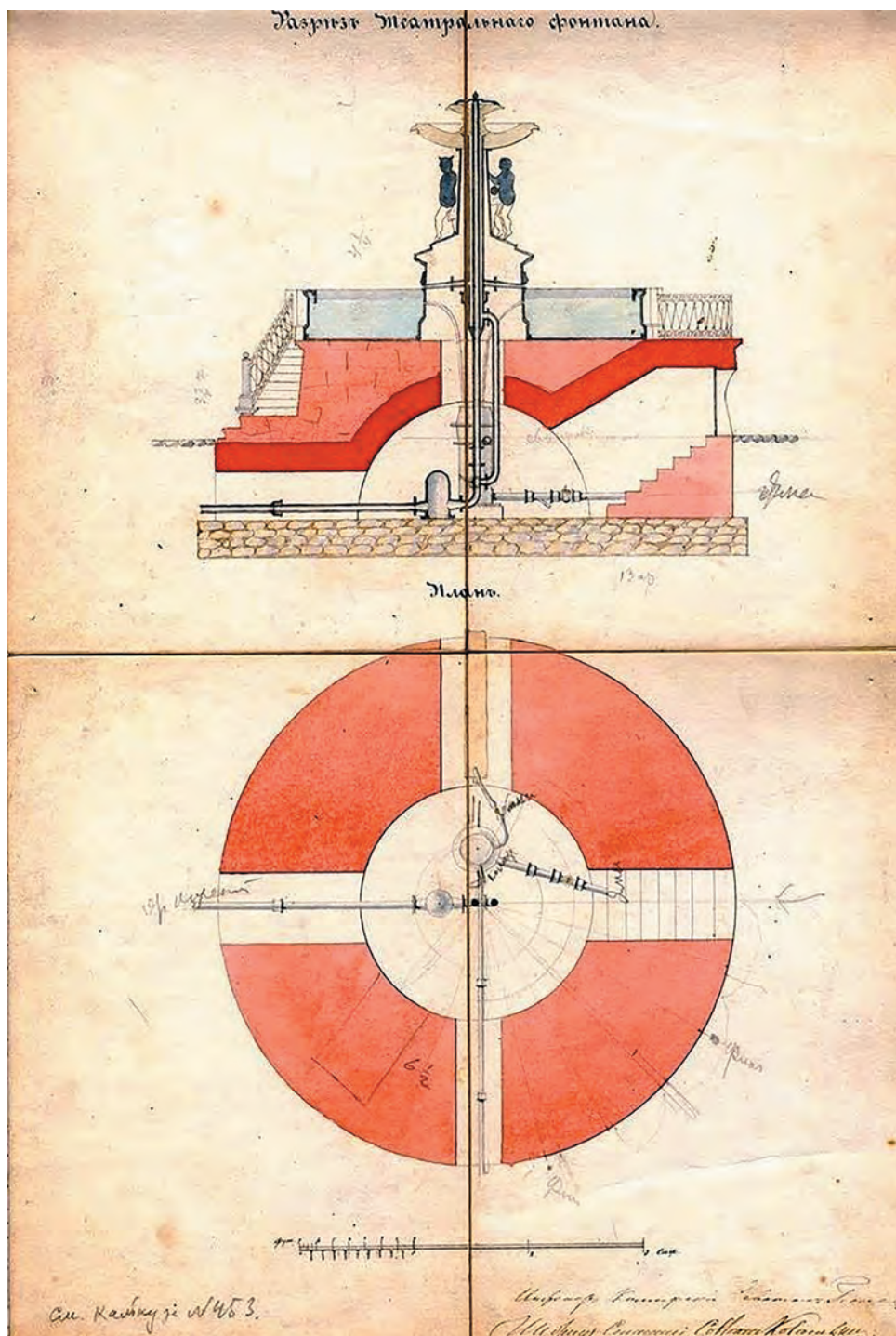


Рис. 2. Схема водораздаточного фонтана на Театральной площади Москвы

Таблица 1. Развитие отрасли — основные исторические события

Дата	В России	В мире
VIII тыс. до н. э.		Зарождение первых «речных» цивилизаций и создание простейших ирригационных систем
I тыс. до н. э.		Сложные технические сооружения античной Греции, в том числе винт Архимеда
XII в.	Широкое распространение частных и общественных бань. Новгородский самотечный водопровод	Артезианские водяные колодцы (графство Артуа, Франция)
XVI в.	Широкое распространение артезианских водяных колодцев	В Европе общественные бани становятся все более редким явлением, почти исчезают
1804 г.	Открытие Московского водопровода	
1853 г.		Создана система канализации и водоснабжения Парижа (Compagnie generale des'Eaux)
1863 г.	Пуск водопровода в Санкт-Петербурге	

Таблица 2. Этапы развития водного хозяйства Москвы и Ленинграда в советский период

Дата	Событие
1926–1928 гг.	Строительство и пуск в Московской области Рублевской станции водоочистки
1929 г.	Объединение управления водопроводов и канализации Ленинграда в единый трест «Водоканализация»
1930-е гг.	Строительство и ввод в эксплуатацию канала Москва–Волга (канала им. Москвы)
1933 г.	Применение первых фильтров со скоростной фильтрацией на Черепковских очистных сооружениях
1937 г.	Запуск в эксплуатацию Сталинской (Восточной) водопроводной станции
1939 г.	Ленинградский трест становится управлением и получает новое имя — «Водоканал», которое сохраняется в названии предприятия по сей день
1943–1950 гг.	Восстановление водопроводных сетей Ленинграда
1962–1972 гг.	Дальнейшее усовершенствование технологии очистки воды в Москве и увеличение ее подачи до 1,2 млн м <sup>3</sup> /сут. Автоматизация очистных сооружений, строительство уникального для тех лет оборудования — озонаторной станции
С 1972 г. по настоящее время	В Москве и Санкт-Петербурге проводится модернизация действующих сооружений и физико-химических процессов на основе достижений медицинской и микробиологической наук

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассматривая технологии в водопроводном хозяйстве и в области подготовки питьевой воды к использованию, не стоит уходить вглубь времен. Действительно, вода всегда использовалась человеком весьма активно, но технологии, если не считать самотечные водоводы, начали появляться только в средние века.

Представим развитие водоснабжения как череду технологических циклов, первый из которых условно назовем доисторическим, в том смысле, что непосредственно о развитии технологий здесь говорить пока рано; второй, переходный, получит название прединдустриального, ведь до технической революции и развития отрасли водоснабжения как индустрии пройдет еще несколько веков; третий, время активного развития водопровода как индустрии, назовем индустриальным. История развивается по спирали, мы начнем с первого ее витка, дойдем до современного состояния отрасли и даже заглянем в ее будущее.

В сильно укрупненной форме этапы зарождения и развития систем водоснабжения (водоподготовки) в мире можно разделить на три основных временных периода:

I — Древний мир, зарождение «речных цивилизаций», простейшая ирригация как толчок к развитию водоснабжения и гидротехники;

II — Средние века, характеризующиеся упадком и обновленным началом технического прогресса с развитием водных технологий и средств производства (применение водяных колес, простейших насосов и насосных станций); первые правовые документы для борьбы с антисанитарией; период накопления теоретических и практических знаний, заложение основ теории гидравлики и создание первых водоводных машин;

III — промышленная революция как интенсивный период в развитии водоснабжения; развитие науки и техники, технологий очистки воды до питьевого качества и подачи ее в промышленных масштабах.

Можно выделить основные этапы развития отрасли водоснабжения (табл. 3, рис. 3) с циклическими переходами от простейшего к высокотехнологичному промышленному производству.

Таблица 3. Основные циклы развития отрасли водоснабжения

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (Древний мир)	Прямое использование естественных источников пресной воды	Обустройство самотечных водоводов и рытье колодцев	Появление крупных поселений, рост аграрного производства	Нехватка легкодоступного водного ресурса
Второй (Средние века и эпоха Возрождения)	Забор воды из поверхностных источников и колодцев без очистки и подготовки	Первые напорные водопроводы с нагнетанием воды насосами и механическими приводами, фонтаны	Резкий рост городского населения, появление мануфактур, артелей	Нехватка чистой воды в местах массового производства и плотного проживания людей, антисанитария, первые законы о чистоте рек

Таблица 3 (окончание)

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Третий (от промышленной революции до наших дней)	Активный забор подземных вод, применение водоподготовки, использование технических средств и новых материалов	Повсеместное строительство водопроводов и создание водоохраных зон источников водоснабжения	Внедрение двухступенчатой очистки воды, развитие водозаборов большой производительности	Переход к практике рационального использования воды, повышение нормативов качества питьевой воды

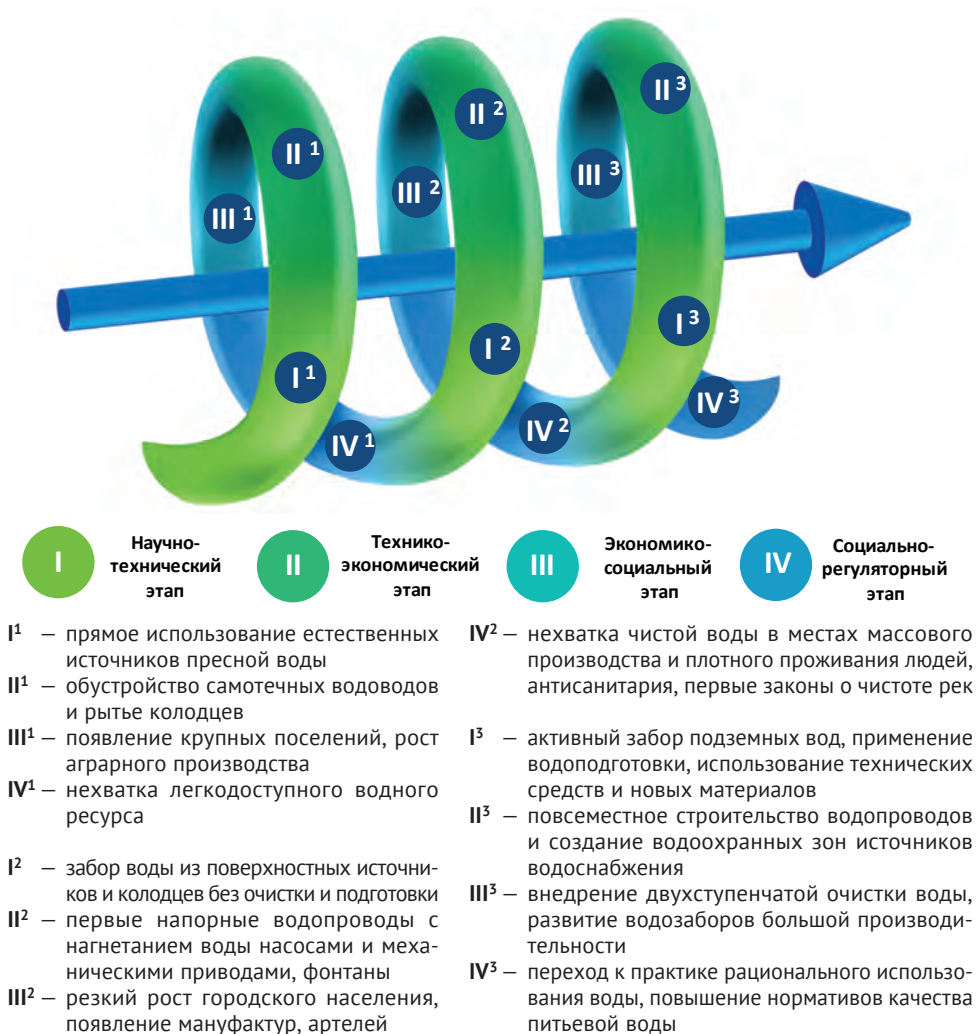


Рис. 3. Эволюция технологий отрасли водоснабжения

### Первый технологический цикл — доисторический

Первый технологический цикл с большой натяжкой можно отнести к индустрии, т. к. в основном речь здесь может идти о самотечных водоводах, которые использовались человечеством с незапамятных времен для устройства оросительных каналов.

Охотники и собиратели дикорастущих растений селились небольшими общинами, центром которых были родник, ручей, река, становившиеся естественным сосредоточением экономической и социальной деятельности.

Более значимая роль воды возникла при переходе от присваивающего типа хозяйства к производящему, когда зарождается специализация районов и возникает торговля. Этот период стал важной поворотной точкой в истории как человечества, так и водоснабжения. Именно в этот момент вода применялась уже не только для приготовления пищи, но и для других целей, главной из которых стало орошение. На это уходило более 80% освоенных в мире запасов воды. К сожалению, вода при этом часто использовалась неэффективно, большое ее количество терялось при испарении, и на поля обычно подавалось слишком много воды, которая только портила плодородие почвы.

При этом в отдельных частях Древнего мира действительно существовали сложные водопроводные системы, например, одно из семи чудес света — висячие сады Семирамиды, расположенные на крыше одного из дворцов Вавилона на специально созданных платформах, орошение которых производилось с помощью подъемников. Великолепные сады с редкими деревьями, ароматными цветами и прохладой в знойной и пыльной Вавилонии были поистине чудом. В IV в. до н. э. дворец царя Навуходоносора стал последней резиденцией Александра Македонского, где в тронном зале и в покоях нижнего яруса садов он провел последние дни своей жизни<sup>11</sup>.

В середине VI в. до н. э. Евфрат изменил свое русло, и резиденция вавилонских царей была перенесена в другое место. Наступил период государственного упадка, который во многом был подготовлен заброшенностью систем государственного орошения земель и моральным разложением общества.

Почему же мы не рассматриваем столь грандиозные сооружения как начало индустрии? Дело в том, что ни чертежей, ни самих ирригационных систем не сохранилось, былое величие сменилось упадком средневековья и история развития остановилась, если не сказать, что пошла вспять.

### Второй технологический цикл — прединдустриальный

С падением Римской империи Европа раннего Средневековья переживала технический регресс. Возникавшие на ее территории новые государства вплоть до XII в. представляли собой небольшие поселения, где в основном занимались мелкими ремеслами и сельским хозяйством. Потребности в воде были небольшими: достаточно было выкопать колодец или жить на берегу реки, водоема.

---

<sup>11</sup> *Бойко В. П. и др.* Очерки истории водоснабжения и водоотведения...



Всюду работали водяные мельницы с малыми и большими жерновами, которые вращали животные. В сельском хозяйстве повсеместно применялся плуг. Использованная вода вместе с нечистотами отводилась на поля, в выгребные ямы или в источники.

В отличие от западной части Римской империи восточная в тот же период оставалась единой и переживала экономический подъем. Здесь в 395 г. н. э. возникло новое государство — Византия, просуществовавшее на протяжении почти тысячелетней истории поздней Античности и Средневековья. Обеспечение населения водой в Константинополе, столице Византии, осуществлялось за счет создания открытых и закрытых водохранилищ — цистерн, под которые отводились фундаменты церквей и других капитальных сооружений. Внутри их обрабатывали специальным водоустойчивым строительным раствором. В этих водохранилищах собирались огромные массы дождевой воды: во всех открытых и закрытых водохранилищах Византии в VII в. н. э. могло скапливаться около 1 млн м<sup>3</sup> воды. В периоды войн подземные помещения вокруг них использовались горожанами как убежища. Одно из самых крупных — Цистерна Базилика, древнее подземное водохранилище, вода в которое доставлялась по водопроводу и акведукам (в том числе по самому большому в Константинополе — акведуку Валента) из источников Белградского леса, расположенных в 19 км от города. Цистерна Базилика могла вмещать около 100 тыс. т воды. Ее длина — 140 м, ширина — 70 м, а площадь составляет 9,8 тыс. м<sup>2</sup>, свод поддерживают 336 колонн девятиметровой высоты, которые находятся друг от друга на расстоянии 4,8 м (рис. 4).



Рис. 4. Цистерна Базилика — одно из самых крупных и хорошо сохранившихся древних подземных водохранилищ Константинополя

Этот замечательный памятник водной архитектуры, сохранившийся до наших дней, располагается в центре современного Стамбула, в нескольких метрах от площади, где находится собор Св. Софии<sup>12</sup>.

Большая часть грандиозных систем водоснабжения, «сработанных рабами Рима», в Средние века оказалась на территориях раннефеодальных государств. Многие из акведуков не поддерживались в должном состоянии, постепенно разрушались, но были и те, которые продолжали подавать воду в средневековые города. Во Франции еще в IV в. н. э. римлянами был построен акведук Аркей, работавший от каптированных родников в 15 км от Лютеции (так раньше назывался Париж). Он давал до 2 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки. Однако в том же веке акведук был разрушен норманнами. Лишь в XII в. из-за нехватки воды во Франции стали бурить глубокие колодцы, получившие наименование артезианских по названию графства Артуа<sup>13</sup>. В Париже водопровод был построен в XIII в. Он снабжал водой замки и несколько водоразборных фонтанов, воду из которых в дома парижан доставляла целая армия водоносов, использовавшая для этого коромысла и шесты.

Похожая система существовала во II в. н. э. в Будапеште: родниковая вода поступала в город по каменному акведуку длиной 4,5 км. Этот водопровод действовал 300 лет. В XV в. на правом берегу Дуная была построена водонапорная башня с насосной установкой, подававшей воду по свинцовым трубам из реки во дворец Буды. В Средние века свой водопровод имел и город Пешт, расположенный на левом берегу Дуная. Но во время нашествия турок эти средневековые водопроводы были разрушены.

Первые системы водоснабжения в Европе стали появляться лишь в XIV в. До этого здесь использовали речную, озерную воду и родники. Жители Варшавы брали воду из реки Вислы и ее притоков. На склоне окрестной горы в Цюрихе в XV в. была каптирована родниковая вода, которая по деревянным сверленным трубам подводилась к нескольким городским фонтанам. До середины XVI в. источниками водоснабжения в Нидерландах были малые и большие каналы. Но с ухудшением качества воды, в том числе из-за повышения соленосодержания, питьевую воду стали доставлять в город на баржах с озер, расположенных вокруг Амстердама.

Жители Лондона брали воду из многочисленных родников на берегах Темзы вплоть до XVIII в. Водоснабжение восточной части Лондона из реки стало осуществляться, когда в 1582 г. инженер Питер Морис установил под береговой аркой Лондонского моста водяное колесо, приводившее в движение вертикальные насосы. Они подавали воду из Темзы по деревянным

<sup>12</sup> Николаев И. С. Акведуки античного Рима. — М. : Принт-Сервис, 2011.

<sup>13</sup> Артезианские воды (от *Artesium* — латинского названия французской провинции Артуа, где эти воды использовались с XII в.) — напорные подземные воды, заключенные в водоносных пластах горных пород между водоупорными слоями. Обычно они залегают на глубине от 100 до 1000 м и встречаются в пределах определенных геологических структур (впадин, мульд, флексур и др.), образуя артезианские бассейны. При вскрытии буровой скважиной или шурфом артезианские воды поднимаются выше кровли водоносного пласта, иногда фонтанируют.

трубам выше башни церкви Св. Магнуса. Однако в 1666 г. эти водозаборные сооружения сгорели во время большого пожара, а после восстановления в начале XVIII в. были проданы частной компании «Владельцы сооружений у Лондонского моста». В 1609–1613 гг. в Лондоне была построена система, снабжавшая западную его часть водой из родников, находившихся за пределами города севернее Лондона в графстве Хартфордшир. Эта пресная вода самотеком поступала по каналу Нью-Ривер, построенному Хью Миддлтоном. Его «New River» была одной из крупнейших частных компаний водоснабжения того времени.

В XII–XIV вв. в Европе начался подъем в развитии технологий и средств производства, ускоривший использование водяного колеса в промышленности: на различных производствах и мануфактурах энергия потока воды заставляла двигаться воздуходувные меха, кузнечные молоты и токарные железообрабатывающие станки, которые до этого управлялись с помощью педалей. Водяное колесо стало приводить в движение насосы для подъема воды. Немецкий ученый Георг Агрикола (1494–1555) описал восемь видов насосов для подъема воды, приводимых в действие вододействующим колесом за счет мускульной работы людей или лошадей. Он утверждал, что разные типы насосов могли поднимать воду с глубины от 7 до 70 м. При многоступенчатой установке насосов высота подъема увеличивалась на 200 м.

Позднее разнообразные насосы были сконструированы итальянским инженером и механиком Агостино Рамелли (1531–1610). Опыты итальянского механика и физика Эванджелисты Торричелли (1608–1647) с системой «цилиндр–поршень» породили идею всасывающего воздушного насоса, который затем был построен немецким инженером Отто фон Герике (1602–1686). Позже эта конструкция была детально проработана англичанином Робертом Бойлем (1627–1691).

Величайшими достижениями водной техники в конце XVII в. мог похвастаться Версальский дворец в местечке Марли на берегу Сены недалеко от Парижа — с парками, фонтанами, водопроводами (рис. 5). Водонапорная система, которая обеспечивала забор воды в Сене и ее подачу к фонтанам в Версале, насчитывала 14 вододействующих колес высотой 12 м и более 200 насосов, установленных на трех уровнях.

Применение водяных колес, приводивших в движение насосы, положило начало строительству в средневековой Европе первых централизованных водопроводов в городах, где воду забирали из шахтных колодцев. Такие водопроводы появились в Вене (1525 г.), Мюнхене (1555 г.), Варшаве (1561 г.), Копенгагене (до конца XVI в.) и других городах. К примеру, с помощью насосных станций воду из шахтных колодцев поднимали в Мюнхене. По мере роста численности населения в городе увеличивалось и число насосов. Вода подавалась в медные баки водонапорных башен, располагавшихся рядом с насосными станциями, из баков она поступала самотеком по деревянным трубам в колодцы общественного пользования и частично в отдельные дома.

Насосы применяли и для забора воды из поверхностных источников. К концу XVI в. было построено несколько водоводов в Копенгагене, которые подавали

воду из озера. В Брюсселе в 1601 г. также был построен напорный водопровод с установкой водяного колеса на реке Мелбек, обеспечивавший подачу 1000 м<sup>3</sup> в сутки и просуществовавший более 200 лет.



*Рис. 5.* Фонтан Латона — визитная карточка Версаля, один из красивейших фонтанов в мире

С помощью вододействующих колес воду откачивали в промышленных рудниках и шахтах. В XVI в. мощность, развиваемая такими колесами, достигала 7,35 кВт, а с использованием сложных рычажных механизмов общей длиной до нескольких сотен метров и более коротких цепных передач она увеличилась к началу XVII в. до 14,7 кВт, или 20 лошадиных сил.

Прединдустриальный этап в истории водоснабжения и водоотведения характеризуется зарождением правового и административного регулирования в сфере водопользования, появлением первых общественных институтов, наделенных функциями контроля за положением дел в водной сфере. К примеру, в испанской Валенсии в 1238 г. был создан «водный трибунал орошаемой территории», а в 1250 г. учрежден «совет мудрецов орошаемой территории Мурсии», который возглавлял назначенный королем судья. Указы о строительстве новых каналов для орошения издавал король. Возникавшие споры и конфликты рассматривались в судах с присяжными. Позднее, в XVI в., в Нидерландах было организовано Общество охраны и улучшения дамб.

Потребность в появлении подобных судов и обществ могла существовать еще и потому, что в то время по всей Европе велось строительство новых водных путей. Крупные каналы для обводнения и судоходства прокладывались в XI и XIII вв. в Италии, Нидерландах и других странах. Первый судоходный

шлюз был построен в 1373 г. вблизи Милана, с 1438 по 1475 г. соорудили 90 км судоходных каналов с 25 шлюзами. В 1605–1642 гг. французы создали Бриарский канал, связавший бассейны рек Сены и Луары, к 1681 г. был возведен судоходный Лангедокский канал длиной 240 км с устройством 100 шлюзов и прокладкой Мальпасского туннеля.

Предындустриальный этап стал временем накопления теоретических и научных знаний<sup>14</sup>. Великий итальянский художник и изобретатель Леонардо да Винчи (1452–1519) написал трактат «О движении и измерении воды»<sup>15</sup>, который был признан первым научным трудом по гидродинамике. Ученый выполнил чертежи вододействующих машин различной конструкции, предложил для определения скорости ветра использовать анемометр, для подъема воды применять центробежный насос, рассмотрел измерения скорости движения воды в реках и каналах, плавание тел и истечение жидкостей через отверстия и другие явления, меандрирующие<sup>16</sup> речные русла, грядовые формы донного рельефа в реках, размыв перекатов (самоочищающие скорости), явление гидравлического прыжка, распределение скоростей по живому сечению потока. Ученому впервые удалось сформулировать идею о неразрывности потока и зависимости скорости потока от гидравлического уклона. Результаты исследований и раздумий великого ученого о воде начали собирать и анализировать только спустя 100 лет после его смерти. В конце XVIII столетия некоторые его разработки попали к выдающемуся итальянскому ученому-гидравлику Джованни Баттиста Вентури (1746–1822), который опубликовал статью «О физико-математических работах Леонардо да Винчи».

В Италии часовщик и механик Джуанело Турриано (1500–1585) в середине XVI в. построил водоподъемную машину, которая проработала в городе Толедо 80 лет. Мастер применил механизм, который заставлял попеременно двигаться латунные трубки с сосудами на концах таким образом, что вода из нижней трубы переливалась в трубу, расположенную выше. Привод машины осуществлялся при помощи водоналивного колеса, системы зубчатых колес и механизма, называемого «нюрнбергские ножницы», позволявшего шарнирно соединить несколько балок посередине и на концах.

Итальянский физик, механик и астроном Галилео Галилей (1564–1642) развивал основные положения гидростатики, объясняя гидростатический парадокс, условия равновесия воды в сифоне и условия равновесия плавающих тел. Эти знания впоследствии были использованы при конструировании унитазов, карбюраторов, систем равновесия кораблей.

Великий французский физик и философ Блез Паскаль (1623–1662), основоположник гидростатики, разработал гидравлический пресс. Итальянский математик и физик Эванджелиста Торричелли (1608–1647) изобрел ртутный

<sup>14</sup> Бойко В. П. и др. Очерки истории водоснабжения и водоотведения...

<sup>15</sup> На русском языке трактат Леонардо да Винчи «О движении и измерении воды» был опубликован в 1824 г.

<sup>16</sup> Меандрирование (от древнегреч. Μαίανδρος, *Меандрос* — древнего названия извилистой реки Большой Мендерес) — это тип русловых процессов, схема деформаций в виде последовательных стадий извилистости речного русла.

барометр и написал трактат об истечении жидкости через отверстия, где сформулировал свой закон, определивший, что скорость истечения зависит от значения извлеченного квадратного корня из напора. Это прообраз формулы  $V = \sqrt{2}gH$ , которая в 1748 г. была выведена швейцарскими математиками и механиками отцом и сыном Иоганном Бернулли (1667–1748) и Даниилом Бернулли (1700–1782).

### Третий технологический цикл – индустриальный

Новый эволюционный период в развитии водоснабжения наступил на волне начавшейся промышленной революции. Начавшиеся глобальные изменения в обществе со второй половины XVIII в. и продолжавшиеся в течение всего XIX в. были связаны со стремительным ростом производительных сил и появлением крупной машинной индустрии. Они происходили в разных странах постепенно, но почти повсеместно возникала острейшая потребность в увеличении объемов подачи воды, которая была необходима для развития водоемких производств и быстрорастущего населения городов.

Изобретение паровой машины Джеймса Уатта (см. подробно на с. 320 наст. изд.) было взято на вооружение при устройстве централизованных систем водоснабжения, которые в XIX в. появились в Чикаго (1842 г.), Варшаве и Брюсселе (1855 г.), Мельбурне (1857 г.), Стокгольме (1861 г.), Будапеште (1868 г.), Риме (1870 г.), Денвере (1870 г.), Хельсинки (1871 г.), Роттердаме (1874 г.), Мюнхене (1880 г.), Амстердаме (1886 г.), Токио (1898 г.) и в других крупных городах. На водозаборных сооружениях почти повсеместно использовались паровые или поршневые насосы с приводами от паровых машин, которые осуществляли забор воды из источников и перекачивали ее на очистные сооружения. Позднее воду стали поднимать плунжерными, а затем и центробежными насосами, что позволило перейти к созданию напорных водопроводов. Это, в свою очередь, потребовало применения новых труб из более прочных материалов в отличие от свинцовых и деревянных. Развитие водоснабжения в эпоху индустриализации ознаменовалось также тем, что стали строиться внутренние системы водопровода: в домах горожан появлялись водоразборные краны, умывальники, души и ванны.

В условиях увеличения подачи воды важно было иметь надежные источники водоснабжения. Для решения этой задачи в отдалении от городов находили источники, строили водохранилища, водоподающие системы каналов и трубопроводов. В Риме в 1870 г. построили систему водоснабжения с питанием от родников, расположенных в 40 км восточнее города; в Будапеште появилось большое число колодцев и лучевых фильтрационных водозаборов<sup>17</sup>, а позднее,

<sup>17</sup> Лучевой водозабор представляет собой шахтный колодец, из которого лучами расходятся водозаборные скважины. Вода из скважин поступает в шахтный колодец, из которого откачивается насосами. Эта система водоснабжения позволяет применять мощные, с более высоким КПД, глубинные насосные установки погружных и непогружных типов, откачивающие воду непосредственно из шахты, и заметно снизить эксплуатационные затраты на добычу подземных вод.

в начале XX в., был построен береговой водозабор на Дунае с водоочистой станцией. В Мюнхене для расширения водоснабжения задействовали подземные воды в долине Мангфалль, в 40 км от города. В Амстердаме с 1848 г. пресную воду для питьевых нужд забирали из дюн с помощью открытого дренажа, а в 1886 г. был построен водозабор на реке Вехо, откуда по водоводу речная вода подавалась в самостоятельную распределительную систему и использовалась преимущественно для хозяйственных нужд.

Подача больших объемов воды в городские сети поставила вопрос о ее очистке и обеззараживании. В 1829 г. в Англии инженер Джеймс Симпсон (1799–1869) построил для лондонского водопровода медленные песочные фильтры, вошедшие в историю как английские. Такой фильтр представляет собой открытый или закрытый (в холодном климате) резервуар шириной 6 м и длиной 60 м, заполненный мелким кварцевым песком на гравийной подложке. В него подавалась вода слоем 1,2–1,5 м, которая фильтровалась сквозь песок со скоростью 0,1–0,2 м/ч под действием силы тяжести. Эффективность этого способа фильтрования была признана высокой: удалялось до 95 % загрязнений, в том числе бактериальных, что подтвердило событие, случившееся в 1892 г. в Гамбурге. В этом немецком городе произошла вспышка холеры, что было неудивительно, потому что с 1848 г. вода из реки Эльбы подавалась в город без всякой очистки. В это же время в соседнем городе Альтона, где в процессе очистки воду пропускали через медленные английские фильтры, эпидемии не было. Первым, кто связал причину возникновения эпидемий с загрязнением питьевой воды, оказался английский врач Джон Сноу (1813–1858). В 1854 г. в Сохо, одном из районов Лондона, где разразилась холера, Джон Сноу в поисках причин ее возникновения самым тщательным образом проводил свое расследование, в результате чего им было сделано это величайшее научное открытие.

Медленные фильтры в XIX в. активно строились и применялись при очистке воды в Берлине, Варшаве, Стокгольме, Денвере, Хельсинки, Роттердаме, Цюрихе, Токио и многих других городах. Но только в Лондоне вскоре после эпидемии холеры законом Метрополии было впервые введено регулирование деятельности частных компаний и установлены стандарты качества воды. Законом предписывалось обеспечивать население чистой и полезной водой, подвергая ее очистке фильтрацией. За этим последовало принятие законодательства об обязательной проверке качества воды, включавшее в себя проведение химических анализов проб воды. Таким образом, был создан прецедент: впервые контроль качества питьевой воды стал осуществляться на государственном уровне и рассматриваться как значимый фактор общественного здравоохранения.

Централизованные системы водоснабжения в середине XIX в. стали создаваться в Соединенных Штатах Америки. В крупнейших городах забор воды производился в основном из поверхностных источников (75 %) и около 25 % приходилось на подземную воду. Особенностью американской водопроводной сети являлись большие водоводы для подачи воды, городские системы водоснабжения имели довольно большую протяженность ввиду разбросанности территории.

В 1842 г. Нью-Йорк стал одним из первых городов, использовавшим водохранилище за пределами городской черты: вода из него подавалась по построенному акведуку. В то же время Нью-Йорк был крупным потребителем и подземной воды, забирая ее из 1200 скважин глубиной в среднем 30 м. Эти скважины соединялись сифонными трубопроводами диаметром 600 мм, куда вода поступала в результате создаваемого разряжения вакуумными насосами. В 1848 г. началось строительство водопроводной системы в Бостоне. Для этого был перекрыт приток реки Садбери, образовавший озеро Кочитуате. Оттуда по акведуку вода поступала в водохранилище Бруклин, которое питало распределительную систему города. В 1853 г. примеру Бостона последовали в Вашингтоне, начав строительство акведука, вода по которому подавалась в город из Большого водопада на реке Потомак. В начале XX в. в развивавшемся Лос-Анджелесе построили акведук и стали получать воду из долины Оуэнс в 375 км от города. В Чикаго установленный водозабор, расположенный на глубине 46 м, забирал воду из озера Мичиган и подавал ее в город по деревянному водопроводу.

В эпоху индустриализации в Америке для забора воды широко использовались водоприемники типа криб (английское слово «криб» переводится как «запирать» или «заключать»). Они представляли собой пустотелое сооружение, напоминающее мостовой бык<sup>18</sup>. Крибы размещали на довольно большом расстоянии от берега, где вода чище. Например, в Сент-Луисе были установлены две водозаборные башни, соединенные с берегом самотечным туннелем, уложенным в скальных грунтах. Самотечные линии прокладывали из стальных труб большого диаметра или туннелей под дном водоема. Насосы для подъема воды располагались в водозаборной башне, от которой прокладывались напорные водоводы. Крибы иногда устраивали в ковшах речных бассейнов (в Детройте, Сент-Луисе) и искусственных водохранилищах (в Лос-Анджелесе, Балтиморе, Спрингфилде и других городах).

Представляет интерес метод борьбы с донным льдом<sup>19</sup> в зимнее время, который применялся на севере США в городах Баффало и Детройт. Для этого использовался пар, который выпускали из проложенного вокруг криба кольцевого трубопровода с отверстиями. За работой этой паровой установки в период образования донного льда наблюдали два специалиста. Этот же метод применяли и для борьбы с обмерзанием решеток водоподъемников.

Поначалу вода из рек и озер подавалась на нужды водоснабжения без какой-либо очистки, потому что была довольно чистой. Однако, после того как Джон Сноу установил связь между загрязненной водой и болезнями, в городах США стали строить водоочистные сооружения, где вода проходила очистку на песочных фильтрах и обеззараживалась хлором. К началу XX в. песчаная фильтрация получила широкое распространение. В 1908 г. непрерывное хлорирование воды в США впервые стало осуществляться в Джерси-Сити, штат Нью-Джерси.

<sup>18</sup> Бык моста — это старое название промежуточной опоры мостового перехода, т. е. та часть моста, на которую опираются балки одного пролета и другого.

<sup>19</sup> Донный лед — скопление масс льда рыхлого губчатого строения на дне естественных водотоков, обычно перед началом ледохода. Донный лед образуется фактически на всех замерзающих реках Азии, Европы, Северной и Южной Америки. Он осложняет работу гидротехнических и водопроводных сооружений.



В конце XIX в. в США изобрели скоростные песочные фильтры, применявшиеся для очистки мутных речных вод. В отличие от медленно действовавших английских американские фильтры были более эффективными. Скорость фильтрования воды превышала нормальную скорость английских в 30–100 раз. Для устройства последних требовались гектары земли, в то время как скорые фильтры могли размещаться в одном небольшом здании. Очистка воды в них представляла собой комбинацию химического и механического способов. Сначала, на первой стадии, происходило коагулирование воды — обработка ее сернокислым алюминием: сернокислая соль алюминия при введении в воду вступала в обменное разложение с находящимися в воде углекислыми солями кальция и магния. В результате образовывался рыхлый хлопчатый осадок гидрата окиси алюминия, который обволакивал находящуюся в воде мусть и бактерии и вместе с ними осаждался на дне отстойного бассейна. На второй стадии очистки освободившаяся от взвесей вода проходила фильтрацию через песок. В зависимости от степени загрязнения воды в качестве коагулянта могло использоваться сернокислое железо одновременно с известью. Это техническое новшество американских инженеров было поистине революционным: с начала XX в. и до настоящего времени скорые американские фильтры широко используются в технологиях очистки воды во всем мире.

## ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ В РОССИИ

Первые сведения об устройстве отечественного водоснабжения относятся к периоду расцвета Древнерусского государства, сменившегося затем феодальной раздробленностью и распадом на полтора десятка княжеств. До монголо-татарского нашествия (1237–1240 гг.) водоснабжение активно развивалось преимущественно в городах, которых, по данным историков, было около 350.

Русские люди строили дороги, мосты, деревянные мостовые, церкви, обносили свои города стенами, в некоторых случаях даже каменными. Обычным делом при выборе места постройки городов было проведение разведки на воду: ее определяли на прозрачность, запах, вкус, цвет. Люди использовали для водоснабжения родники, ключи, реки и озера; большое внимание уделяли качеству воды, умели разведывать подземные воды, отдавая им предпочтение перед поверхностными, устраивая колодцы (рис. 6). Качество морской воды, которую использовали для солеварения, определяли пробным анализом путем ее выпаривания.

Для захвата воды повсеместно строились пруды, шахтные колодцы, колодцы над родниками и буровые скважины. Подъем воды из рытых колодцев осуществлялся ведрами с шестами-журавлями, из трубчатых колодцев — желонками<sup>20</sup> с журавлями. Вода проводилась на близкие расстояния по деревянным желобам, на более далекие — по деревянным трубам, деревянным и кирпичным каналам. Для хранения воды устраивали земляные бассейны, глубокие колодцы,

<sup>20</sup> Желонка — посуда цилиндрической формы, которой вычерпывают воду из колодца или скважины.

большие деревянные резервуары бочарной работы. Для выварки соли применяли «црены» — огромные, хотя и невысокие железные резервуары.

Русские города и подчас даже монастыри были прежде всего крепостями, а потому со времен Древней Руси вплоть до конца XVII столетия на случай вражеской осады в них устраивались длинные тайники к источникам воды, которые тщательно маскировали. Лишение воинов и целых городов воды было очень коварным и страшным испытанием. Из «Слова о полку Игореве» известно, что из-за недостатка воды во время половецкого побоища 1185 г. измученные жаждой войска князя Игоря потерпели поражение. Во время осады 1186 и 1207 гг. невыносимые мучения без воды испытывал город Пронск и в итоге вынужден был сдаться. Он оказался отрезан врагом от реки Прони, откуда брал воду, и в обоих случаях нападавшие на город войска перекапывали реку и отводили ее течение по другому направлению. История знает немало примеров, когда вода (или ее отсутствие) превращалась в грозное оружие, предreshавшее исход многих событий. Конструкции тайников зависели от топографии местности, характера и расположения источника. Часто это были сложные сооружения из дерева, реже — из камня.



Рис. 6. Старый колодец в русской деревне

В летописях сохранились сведения о том, что русские люди посещали другие страны, где узнавали об опыте устройства водоснабжения. Митрополит Исидор со свитой в 1436–1439 гг. ездил на Флорентийский собор и посетил многие города. Русские люди не только видели своими глазами водопроводы, фонтаны, подъем воды, использование ее в качестве двигательной силы, но и знали об устройстве водоснабжения из литературы, к примеру, из сочинений Витрувия Поллиона «Десять книг об архитектуре» и других ученых и механиков.

Великий Новгород имел торговые связи с Византией и Западной Европой. Бывая в Константинополе, столице Византии, новгородцы описывали

водопроводы Софийского собора, палат и бань византийского императора. Возможно, их внимание могла привлечь работа восточных римлян, считавшихся непревзойденными мастерами кирпичной кладки: в Великом Новгороде мостить улицы начали раньше, чем в Европе. В конце XI — начале XII в. в этом городе на Ярославовом дворище построили водопровод из деревянных труб. Во время археологических раскопок были также раскопаны дренажный и водосточный каналы. Но, несмотря на возможное заимствование чужого опыта и знаний, водоснабжение на Руси развивалось своим самобытным путем в силу природных, климатических и политических особенностей.

На этапе зарождения водоснабжения и водоотведения на Руси X–XVI вв. русские люди имели достаточный опыт в устройстве шахтных колодцев, пищевых промыслов, водостоков и гидросооружений, в постройке первых водопроводов, бурении на воду. Однако монголо-татарское нашествие значительно затормозило развитие и водоснабжения, и русской техники в целом.

Рассмотрим развитие водоснабжения и водоотведения в соответствии с технологическими циклами.

### Водоснабжение (водоподготовка) — начало отрасли экономики

У городов, стоявших на реках и других водоемах, затруднений с водоснабжением обычно не возникало. Но во времена войн и продолжительных осад городов доступ к воде даже благодаря потайным ходам (рис. 7) нередко становился затруднительным. Именно поэтому с давних времен русские люди рыли колодцы. Упоминания о них встречаются в летописях.

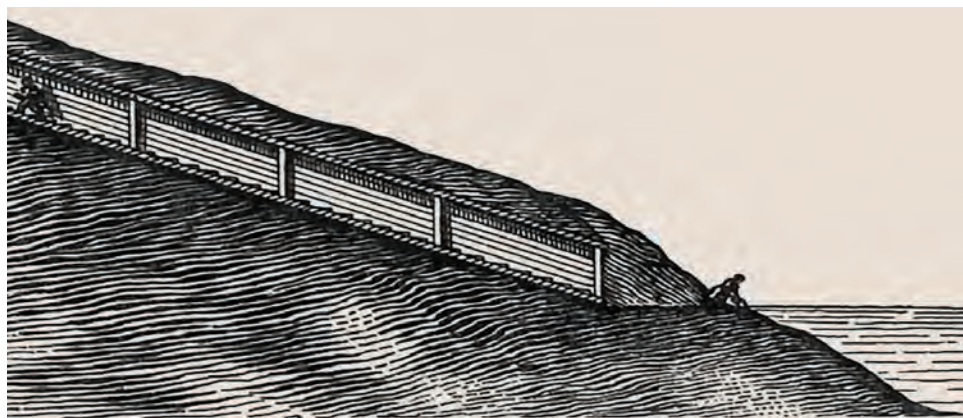


Рис. 7. Тайник к воде обычный

Поначалу колодцы были в виде ям без сруба. К примеру, в скифском поселении рядом с Ольвией (современный город Николаев на Украине) ямы-жилища были устроены вокруг большого колодца глубиной 11 м. Колодезная яма имела диаметр 7,0 м, а в нижней его части — 3,5 м. Такие ямы копались мотыгой шириной 6 см с легким выгибом. Глубина штыка в зависимости от грунта составляла

10–22 см. Очевидно, два человека копали землю, насыпали ее в ведра, которые вытаскивались теми, кто стоял наверху. В верхней части были пазы балока, лежащих крест-накрест. По ним могли спускаться и забирать воду из колодца, но, возможно, они служили для перекрытия колодца.

Колодцы сооружали в монастырях: их было несколько в Киево-Печерской лавре. Колодец Студенец, построенный в 1259 г. посреди города Холма, был очень глубоким — 35 сажений<sup>21</sup>, или около 75 м. Одежда колодцев делалась в основном из дерева. Большая глубина колодцев говорит о том, что стены выкладывались обработанными бревнами не только сверху, но и с подведением венцов снизу.

При устройстве соляных промыслов на Руси применялось бурение на воду. Первые упоминания об этом относятся к 1370 г. Существовала даже рукопись XVI — начала XVII в., в которой излагалось подробное руководство по бурению при солеварении. Бурение скважин являлось сложной и очень продолжительной работой. Право на бурение предоставлялось царскими грамотами. Все это подтверждает самобытное происхождение бурения на Руси.

В XVI в. буровые колодцы назывались трубами. В Усолье применялось так называемое ударное бурение в трубах при помощи тюрника — колодезной бадьи с малым сквозным отверстием на дне. Ударом тюрник входил в землю, которую после выбирали. Но если попадались каменные и шиферные слои, в ход шли пилы, бурава и другие орудия труда. «По писцовой книге 1545 г. города Старой Руссы в числе 7636 ее жителей значится: трубных соляных мастеров — 8, рукавщиков — 3, трубников — 1, бочаров — 1, ведерников — 2. Это свидетельствует, кстати, о развитии ремесел, близких к водоснабжению, говорит о широком распространении буровых колодцев»<sup>22</sup>. Колодцы были артезианские: фонтанирующие, самоизливные и подходившие близко к поверхности земли. Из трубчатых колодцев подъем воды осуществлялся желонками при помощи шестов-журавлей, для чего использовались ведра и бадьи.

На соляных промыслах подъемом воды и ее розливом в лари (резервуары) и желоба занимались водоливы или водолеи. Существовала должность бурового мастера. В это время у людей, работавших на промыслах, были правильные представления о влиянии работы одной скважины на дебит другой. Для этого на промыслах ограничивали откачку рассола, чтобы его не испортить из-за притока пресной воды.

Инструментальный цикл характеризуется развитием водоснабжения на пищевых промыслах и в первую очередь на соляных варницах. Для их устройства осуществлялся поиск подземных соляных вод, строительство колодцев, прудов, подъем воды и направление ее самотеком по преимущественно закрытым каналам, желобам и деревянным трубам в соляные варницы. Только в одной Старой Руссе, по писцовым книгам, существовало 600 частных варниц. В самом городе построили целую водопроводную сеть для разведения соляной воды по городу. Отпуск соляной воды регулировался, из-за чего жители имели у себя запасные

<sup>21</sup> При переводе сажений в метры условно принято 1 сажень сравнивать с 2,13 м.

<sup>22</sup> Фальковский Н. И. История водоснабжения в России. — М., 1947.

колодцы, кади, лари или бассейны для обеспечения нормального процесса солеварения. Солеварни имелись у новгородских монастырей и даже у самого царя Ивана IV Васильевича, прозванного Грозным.

Солеварение было широко развито на Русском Севере, где для получения соли использовали морскую воду: в Порьегубском, Пильско-Губском усолье, на Тотемских соляных промыслах, в Сумской волости. В 1564 г. в Усолье Камском на своем промысле солевары Строгановы нашли рассол (19%) на глубине 117 м.

Помимо солеварения на Руси очень распространенным был еще один промысел — квасоварение. В основном квас варили в монастырях, для чего требовалось не только много воды, но и рабочая сила. Нередко квас подавали в разные монастырские постройки по трубопроводам, для него имелись запасные баки и т. п.

Развитию водоснабжения на Руси способствовало умение русских людей строить различные гидротехнические сооружения: водяные рвы вокруг городов на случай осады, шлюзы, каналы, пруды. В конце XV в. по повелению царя Ивана III Васильевича итальянский зодчий Пьетро Антонио Солари (1445–1493), известный как Петр Антонин Фрязин, построил вокруг Кремля грандиозный водяной ров, который проходил через Красную площадь и был длиной 541 м, шириной поверху — 36,4 м, глубиной — 8,5 м, а напротив Константиновской башни его глубина достигала 13 м. Вода для этого рва забиралась из речки Неглинной и удерживалась шлюзами. На самой реке выкопали пруды.

В середине XVI в. в Соловецком монастыре для различных хозяйственных нужд провели воду из 52 озер (рис. 8), работали и водяные мельницы. В 1556 г. их было три и одна толчея (ударная мельница), где способом дробления измельчались зерно и различные материалы.

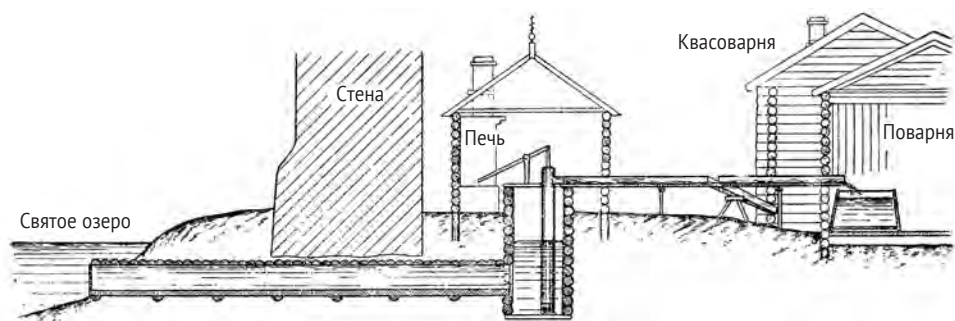


Рис. 8. Водопровод в Соловецком монастыре

В монастыре имелся колодец, куда по подземной трубе, проходившей под крепостной стеной, вода поступала из копаного Святого озера. Он был обнесен деревянным крытым строением, из которого вода по желобам отводилась в соседние здания: кухню, квасоварню. Примечательно, что вода поднималась помпой, для ее нормальной работы в зимнее время помещение обогревалось постоянно работавшей печью.

Устройство мельниц на прудах и реках боярских поместий свидетельствовало о том, что на Руси применялись различные инструменты для помола зерна, подъема строительных материалов и, конечно же, воды — при помощи специального блока, приводившегося в движение впряженными лошадьми. Эта механизация процессов приближала этап создания напорных водопроводов. Но на Руси в X–XVI вв. водопроводы продолжали оставаться преимущественно самотечными. Свидетельства о них сохранились в летописных сказаниях. Например, во время осады великим князем Владимиром в 989 г. греческого города Херсонес (Корсунь) его удалось взять только после того, как был разрушен трубопровод, по которому вода в город подавалась самотеком из источников.

На примере устройства деревянного водопровода в Великом Новгороде<sup>23</sup> XI–XII вв. видно, что его трубы состояли из двух выдолбленных пластин, плотно пригнанных, но не скрепленных. Внутренний диаметр труб — около 140 мм, наружный — 300 мм. Колено в 120° сделано соединением труб под углом, а стык для герметичности плотно обмотан берестой. Очевидно, наполнение труб было менее половины диаметра, расход воды мог составлять 2–3 л/с. Не исключались утечки в стыковых соединениях и вероятность дренирования грунтовых вод. Водопровод имел деревянный (из бревен) смотровой колодец.

Во время сооружения каменного Московского Кремля в 1492 г. также построили самотечный водопровод. Он начинался от Угловой Арсенальной (Собакиной) башни, где источником водоснабжения служил мощный родник, выбивавшийся в подземелье башни. Заполняясь водой, подвал башни был не только каптажем, но и запасным резервуаром для воды.

Учитывая особую топографию местности, на которой стоял Кремль, строителям предстояло провести подземный водопровод таким образом, чтобы вода подавалась в отдаленные части крепости. По данным исследователя истории водоснабжения России Н. И. Фальковского, при постройке водопровода строители могли руководствоваться указаниями Витрувия о применении уклона «не менее четверти фута на каждую сотню», т. е. 0,0025. В 1486 г. сочинения этого римского инженера и архитектора были напечатаны на латинском языке, как и «Десять книг о зодчестве» Леона Батисты Альберти. Последний полагал, что «канал должен через каждые восемь стадий становиться ниже на фут», что соответствует уклону 0,0002. Наибольший уклон он рекомендовал до шести футов на той же длине, или 0,0012. Среднее падение местности в Кремле было значительно больше этих значений. Если допустить, что отметка начала самотечного водопровода в Собакиной башне располагалась на 4–5 м ниже поверхности земли, то имевшееся падение все же позволяло провести воду к наиболее удаленным башням. Даже при линии с уклоном 0,005 и 0,010 — от возможного пола подвала — строительство водопровода было вполне осуществимым. Но подземный ход не всегда шел с нужным уклоном, поэтому канал уложили «на основаниях каменных» разной высоты.

<sup>23</sup> Самотечный деревянный водопровод Великого Новгорода был раскопан на древнем Ярославовом дворе (княжеской резиденции) незадолго до Великой Отечественной войны.

Работа по разведению воды самотеком каменными каналами, требующая соблюдения уклонов, была гораздо сложнее прокладки свинцового трубопровода. Однако свинцовые трубы в те времена вполне могли использоваться и работать полным сечением под давлением, если учесть, что подвал Собакиной башни для нижней части Кремля служил по сути водонапорным резервуаром.

### Переход к техническому развитию отрасли

Период XVII–XVIII вв. в истории водоснабжения и водоотведения России представляет большой интерес с точки зрения эволюции техники. Русским людям предстояло пройти путь от рытых колодцев и тайников до постройки первых напорных водопроводов в Московском Кремле, устройства в XVIII в. в Петергофе фонтанов и проведения из Мытищ в Москву первого городского водопровода.

Сложная международная обстановка начала XVII в. требовала укрепления Русского государства. С 1636 г. было построено большое количество новых пограничных крепостей: Верхний и Нижний Ломов, Тамбов, Чернавск, Козлов. Вместе с Ельцом, Кромами и Ливнами они образовали внутреннюю оборонительную линию. Новые города появлялись между Доном и Ворсклой и в других местах. В этих городах-крепостях для надежного обеспечения водой устраивали тайники, представлявшие собой в сравнении с прошлым периодом более сложные сооружения. Если раньше они служили скрытыми подземными ходами из города, расположенного на высоком холме, к ближайшему источнику воды, то в XVII в. тайники в подавляющем большинстве стали вести к скрытому под землей колодцу с грунтовыми ключевыми или инфильтрационными водами<sup>24</sup> из открытого водоема. Их конструкция зависела от топографии местности, характера и расположения водоисточника, строительных материалов и других условий. Тайники делали в основном из дерева, камень и кирпич применялись редко. Их высота достигала 2 м, ширина — от 2 до 5 м. В длину они могли достигать 200 м, такими же большими над ними были и подземные помещения. Колодцы были больших размеров, иногда их имелось несколько.

Помимо захвата подземных вод в тайники подводилась вода из поверхностных источников по подземным трубам или крытым каналам, что хорошо видно на примере тайника, построенного в городе Ладога: вода поступала по трубе из реки Волхов в колодец под башней (рис. 9). По такому же принципу были устроены тайники Глебовского татарского пролома, в Чернавске и других местах. Хотя тайники строили из прочного дубового леса, они все равно подгнивали, обрушивались и требовали частых ремонтов.

Водоснабжением крепостей ведал Пушкарский приказ, где велась точная техническая отчетность. Общественные колодцы обычно строились на деньги из казны, но при этом население облагалось налогом на их устройство и содержание.

<sup>24</sup> Инфильтрационные воды — подземные воды, образующиеся в результате просачивания через песок или почву с земной поверхности дождевых, талых и речных вод.

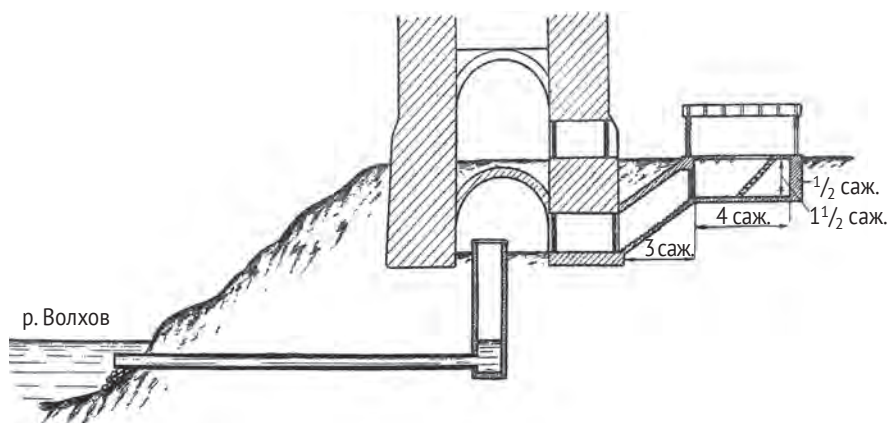


Рис. 9. Тайник города Ладога (реконструкция по Н. И. Фальковскому)

В русских городах существовали как общественные, так и частные колодцы, а также пруды. Свой колодец был в 1680 г. в одной из палат Казанского двора, внутри квартала колодец вырыли и рядом с Никольской башней Московского Кремля. Колодцы имелись в отдельных дворах, чаще их устраивали в огородах и садах для облегчения полива.

Рытье колодцев считалось делом сложным. Для этой цели нередко приглашали мастеров из Москвы. Ценились они дорого: Макарьево-Унженский монастырь в 1624 г. выкопал у себя новый колодец, за что заплатил мастеру два рубля, в то время как корова, например, стоила один рубль.

Колодцы обычно делали из дерева, по возможности — из дуба. Глубина воды в них была разной — от 1–3 до 9 м. Из дошедших до нас рисунков конца XVII в. видно, что оголовки колодцев делались по-разному (рис. 10) и были квадратными, шестигранными, круглыми, неопределенной формы. Часто вокруг оголовка колодца изображены большие камни. Видимо, их укладывали, чтобы не запачкать обувь.

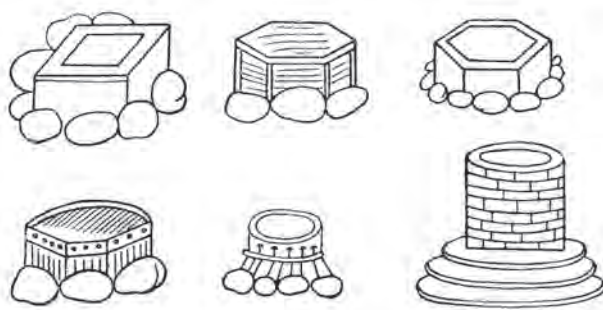


Рис. 10. Оголовки колодцев (по Н. И. Фальковскому<sup>25</sup>)

<sup>25</sup> Фальковский Н. И. История водоснабжения в России.



Представляет интерес устройство водоснабжения в Пскове, который для Русского государства имел большое экономическое и военное значение. В городе насчитывалось 216 водоразборных и 42 противопожарных колодца. Первые — монастырские, дворовые и уличные (общественные) — служили для хозяйственных нужд, а вторые предназначались для забора воды при пожаре. Помимо колодцев жители Пскова пользовались водой из протекавших по всему городу канала и ручья. Поскольку Псков был крепостью, вода в город также подводилась из реки в колодец по подземному каналу, что свидетельствовало о наличии тайника.

Как и раньше, воду из колодцев поднимали журавлями, но усовершенствованными: можно было забраться по перекладинам на столб, чтобы изменить длину плеча рычага или высоту его крепления. Для подъема воды также использовали блоки и ворота, в отдельных случаях — четочные водоподъемники и ступальные колеса (рис. 11).

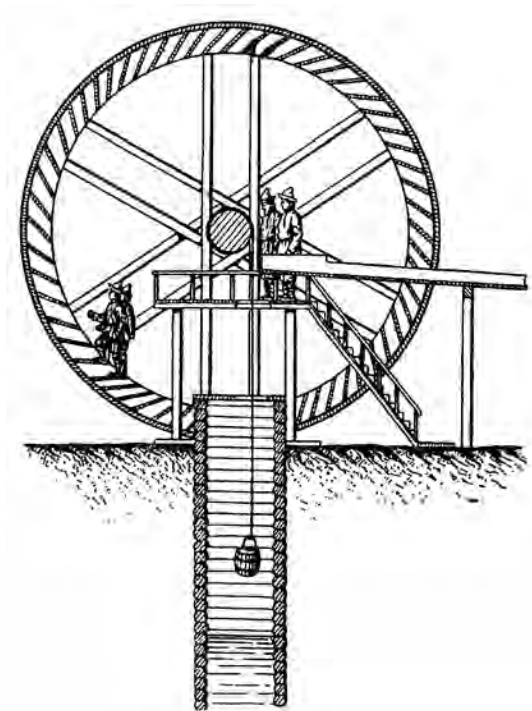


Рис. 11. Подъем воды в Троице-Сергиевой лавре с помощью ступального колеса

В XVII в. для хозяйственно-питьевых нужд в русских и украинских городах строили самотечные водопроводы. Источники водоснабжения для них были разные. В Кирилло-Белозерский монастырь вода поступала по желобам из Сиверского озера. В Киеве самотечный водопровод общей протяженностью 0,5 км устроили дренажем родников и проведением воды из них по деревянным

сверленным трубам во двор Киевской академии и соседние места на Подоле. Там же была проложена уличная водопроводная сеть, сделаны вводы во владения и водоразборные фонтаны во Фроловском и Братском монастырях. Общественный фонтан устроили на Торговой площади. Сборный резервуар воды располагался на 30 м выше Подола.

Первый напорный водопровод с нагнетанием воды насосами и механическими приводами появился в XVII в. в Московском Кремле в период царствования Михаила Федоровича. Предпосылкой для его строительства стало не столько военное значение крепости, сколько деловые интересы первых Романовых, которые владели мануфактурами, являлись монополистами в вывозе за границу различных товаров, предметов и т. п. Им принадлежали мастерские, располагавшиеся на территории Кремлевского дворца, для работы которых требовалось много воды: пивоварня, квасоварня, медоварня, бочарная, воскобойная, сушила для ветчины и рыбы, хлебный дворец, прачечная, несколько бань и т. п.

До постройки водопровода вода развозилась на водовозных телегах лошадьми, имелись также водовозные бочки и водовозы. Но этого количества воды было явно недостаточно. Постройкой водопровода в 1631–1633 гг. занимался Христофор Галовей, механик и архитектор из Шотландии. С его именем связана не только установка шатра на Спасской башне Московского Кремля, но и устройство в Водовзводной башне водоподъемной машины, за которую, по свидетельству иностранцев, из казны отдали несколько бочек золота.

Кремлевский водопровод Москвы XVII в. (рис. 12) был устроен следующим образом. В нижней части Свибловой башни, фундамент которой находился на отметке дна реки и стоял на сваях, построили белокаменный колодец диаметром 4 м. В него из Москвы-реки самотеком по трубе поступала вода. Глубина колодца доходила до 5–6 м. Далее вода из колодца и башни поднималась водоподъемной машиной, после чего за башней закрепилось название Водовзводной. Подъем воды осуществлялся лошадьми. Судя по гравюру Кремля Петра Пикара (1715 г.), к Водовзводной башне примыкало небольшое здание нежилого типа, которое вполне могло служить для конского манежного или водильного привода.

Вода поднималась в выложенный свинцом напорный резервуар на башне. Затем по свинцовым трубам она направлялась в водовзводную палатку, выполнявшую роль регулирующего резервуара. Из него вода по свинцовым трубам, проложенным в земле, распределялась и шла в Сытный, Кормовой, Хлебный, Конюшенный и Потешный дворцы, а также на пивоварню и в другие места. Здания, в свою очередь, были оснащены водоемами, водовзводными ларями, выложенными свинцом и опаянными английским оловом. Помимо основного водонапорного резервуара в башне напорные баки установили в отдельных пунктах водозабора. Такое техническое решение позволяло иметь запасы воды и в то же время нивелировать давление воды в сети во избежание гидравлических ударов. Напорный водопровод в Москве построили раньше, чем во многих западноевропейских городах.

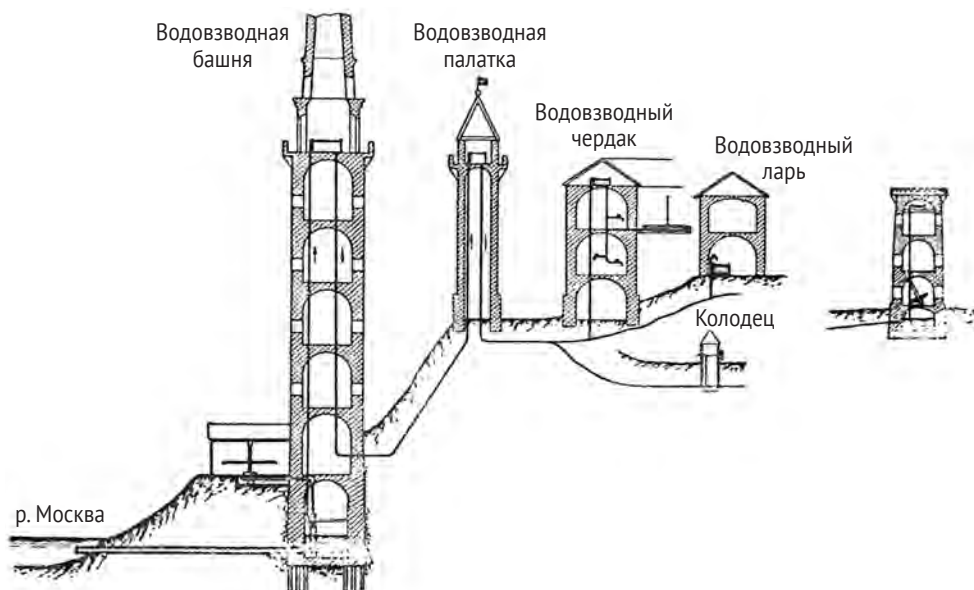


Рис. 12. Схема водопровода в Московском Кремле в XVII в.  
(по Н. И. Фальковскому<sup>26</sup>)

В XVII в. основной промышленностью по-прежнему оставалось солеварение, для которого требовалось большое количество воды. После шведского и литовского разорения Старой Руссы соляной промысел здесь пришел в упадок. Однако он стал возрождаться, после того как в 1671 г. был издан царский указ, по которому солеварение становилось государственным делом. Петр I, проезжая через Старую Руссу в 1693 г., велел принять меры к развитию солеварения, и уже к 1710 г. в городе насчитывалось 70 варниц.

Характерным для солеварения являлось устройство плотин с водяными колесами, которые приводили в движение насосы, качавшие раствор на градири. На соляных промыслах использовались насосные трубы из зеленой меди. В XVII в. на Севере широко было распространено солеварение на морской воде. Для этого строили водозаборные сооружения и длинные трубопроводы. Во время зимнего промысла морская вода сначала подводилась в колодец, испарялась, вымораживалась и тем самым становилась «прибыльнее». Затем из колодца рассол поступал в лари или кадки при варницах. На летних мелких промыслах морская вода после забора из колодца подавалась по желобам, что требовало соблюдения уклонов, устройства основания (хотя бы козел).

Середина XVII в. — период появления различных мануфактур, первых горных и железоделательных заводов, для работы которых строились пруды, плотины, водохранилища. Вода из них подавалась по деревянным трубам и желобам на водяные колеса, которые приводили в движение различные машины и механизмы. Такие плотины имелись на Угодском, Потовском, Ведминском

<sup>26</sup> Фальковский Н. И. История водоснабжения в России.

и Каширских заводах. В 1701 г. в Измайловском селе насчитывалось 27 прудов и 10 мельниц. Все это послужило основой для значительного развития в XVIII в. промышленного водоснабжения.

В то время плотины, пруды и вешняки<sup>27</sup> были на каждом крупном заводе. Например, на Екатерининском заводе имелось 50 гидравлических колес диаметром до 6 м, к которым вода подводилась из ларей. В системе работали и насосы. Работу этого мощного по тем временам гидросилового хозяйства обеспечивало водохранилище с созданной на нем плотиной длиной 98 саженей, шириной 20 и высотой 3 сажени.

Вода широко использовалась в качестве движущей силы в горной промышленности: с ее помощью промывали руды. Для этого применялись насосы, водяные колеса и паровые машины. На промыслах воду подавали по деревянным желобам, которые делали из толстых бревен. Воду поднимали ручными деревянными насосами, на которых работало по одному человеку. Применялись насосы «высокой руки» (нагнетательные) и «низкой руки» (всасывающие). Для этого на промыслах изготавливались всасывающие и нагнетательные сверленные трубы.

Со второй половины XVIII в. в промышленности для различных целей достаточно широко для подъема воды начинают применяться паровые машины. До изобретения первой в России паросиловой установки И. И. Ползуновым (1728–1766) в большинстве случаев на отечественных заводах и мануфактурах того времени использовались пароатмосферные машины по типу машины Ньюкомена (рис. 13).

В XVIII в. водоснабжение городов основывалось на местных водоисточниках, рытых колодцах, прудах. Стены и башни прошлого века теряли свое военное значение, уходили в историю и тайники, хотя в петровское время они еще поддерживались и в некоторых крепостях даже строились. На этом фоне устройство царем-реформатором Петром I замечательных дворцовых водопроводов, приводивших в действие фонтаны, выглядело для России изыском, чем-то новым в деле техники. Петр I решает благоустроить новую столицу Российской империи — Санкт-Петербург — по примеру выдающихся примеров достижений техники того времени: французских Версаля и Марли с их многочисленными фонтанами, парками, садами.

В 1709 г. Петр I издал указ «О более прилежном производстве работ по устройству фонтанов» на месте будущего Летнего сада, которым занимался всю жизнь. Для снабжения фонтанов водой царь к 1718 г. построил Лиговский канал протяженностью около 23 км. Однако из-за трудностей проведения воды под речкой Фонтанкой эта цель не была достигнута. Воду в итоге отвели к прудам Таврического сада, откуда каскадом она спускалась в Неву. На Лиговском канале устроили плотины с мельницами, воду из него позднее использовали многие предприятия.

<sup>27</sup> Вешняк: 1) отверстие в плотине, пропускающее паводковые воды; 2) водяная мельница упрощенного типа, работающая только при высоком уровне воды в реке, отчего мельничные колеса приподняты над меженным (средним) уровнем; 3) подъемный затвор в плотине.

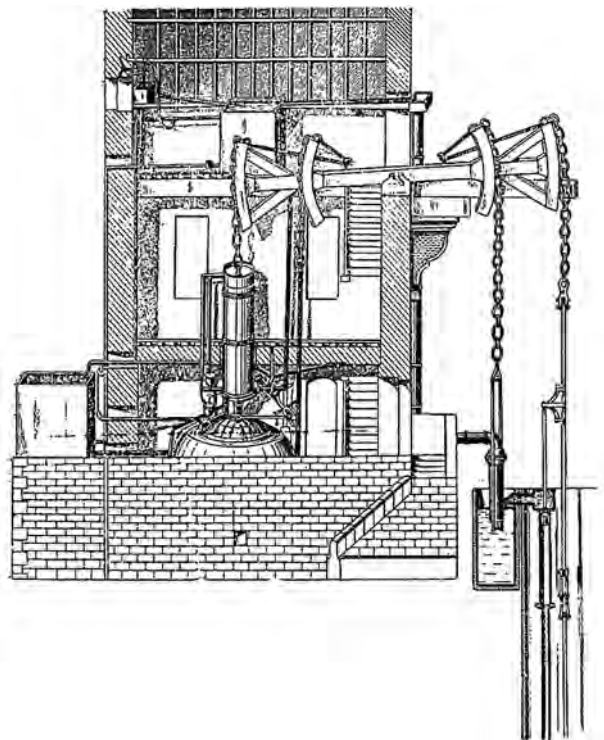


Рис. 13. Чертеж паровой машины Ньюкомена

Задача подъема воды для фонтанов Летнего сада была решена после приобретения Петром I пароатмосферной машины английского механика и изобретателя Томаса Севери (1650–1715)<sup>28</sup>. Ее круглый паровой котел имел емкость около 2,5–3,0 м<sup>3</sup>, рабочий цилиндр вмещал около 0,5 м<sup>3</sup> воды и в течение минуты наполнялся и опорожнялся четыре раза. Производительность машины была около 2 м<sup>3</sup>/мин, или 120 м<sup>3</sup>/ч. Вода всасывалась из колодца с глубины 8,7 м и нагнеталась давлением пара еще на 3,3 м, высота подъема, таким образом, составляла 12 м.

В начале XVIII в. была создана парадная императорская резиденция в Петергофе, которая как шедевр гидравлического искусства превзошла прославленное водоснабжение Версаля (рис. 14). Для ее строительства через резидента в Париже запросили чертежи лучших дворцовых сооружений, пригласили французского архитектора и мастера садово-парковой архитектуры Жана-Батиста Леблона (1679–1719), наняли 2 тыс. рабочих. Фонтаны питались из возвышенного резервуара, куда двумя водопроводами (старым и новым) самотеком провели воду, собирающуюся из многочисленных ключей у нескольких деревень. Вода текла частью по естественным руслам, частью — по рытым каналам, собираясь в общий Петергофский водопровод.

<sup>28</sup> Водоснабжение Санкт-Петербурга / ред.-сост. А. П. Авсюкевич, Ф. В. Кармазинов, И. М. Алексеев, М. И. Алексеев и др. — СПб. : Новый журнал, 2003.



Рис. 14. Фонтаны Большого каскада Петергофского дворца

Из водопроводных работ, начатых Петром, особым великолепием отличалось также водоснабжение Царского Села. Петр I построил много разнообразных по назначению каналов и вообще интересовался вопросами водоснабжения, что подтверждают его личные записи: «Чтоб провести воду с веру Невы и сделать маленькую плотинку и колесо поставить; О делании бассейна при оранжереях; О махине водяной, что у Гаги по каналу Утрехтскому и в Лоу; О пожарном орудии» и др.

В истории водоснабжения важным событием рассматриваемого периода явилось строительство Мытищинского водопровода в Москве. В городе в зимнее время проживало 400 тыс. человек, работали сотни заводов, мастерских, бань, требовавших большого количества воды. Реки Неглинная и Яуза были запружены и сильно загрязнены, и Екатерина II поручила русскому генерал-поручику немецкого происхождения Фридриху Вильгельму Бауэру (1731–1783) провести изыскания ключей в городских окрестностях. Выбор пал на ключи с прекрасной водой недалеко от села Большие Мытищи<sup>29</sup>.

Было собрано 62 родника при помощи 28 кирпичных бассейнов. Из них вода самотеком поступала в главный канал. Стенки колодцев основывались на деревянных ростверках, поднимались несколько выше поверхности земли и покрывались деревянной кровлей, в которой делались слуховые окна для вентиляции воздуха. К 1805 г. было построено 43 бассейна с 73 родниками. На главном водопроводном канале через 213 пог. м устроили вентиляционные

<sup>29</sup> От истока до Москвы: [история московского водопровода] / С. В. Храменков, В. З. Волков, О. М. Горбань, Е. Г. Калашникова, В. П. Фомушкин. — М. : Прима-Пресс-М, 1999.

колодцы. При пересечении реки Яузы у Больших Мытищ вместо кирпичного канала проложили два чугунных, диаметром 300 мм между двумя колодцами в виде дюкера длиной 55,4 м. В каждом колодце находился чугунный резервуар. При пересечении Поклонной горы, богатой подземными водами, местные ключи были захвачены водопроводным каналом, в кладке которого для этой цели сделали небольшие отверстия.

У деревни Ростокино над рекой Яузой был возведен акведук (рис. 15), который сохранился до наших дней и является историческим памятником водопроводного искусства XVIII в. Он имеет длину 356 м при ширине 3,5 м. Галерея расположена на 21 арке пролетом 8,5 м каждая на каменных устоях высотой до 15 м. На 4 м выше сводов арок по обеим сторонам выведен карниз, над которым сделан парапет. Вода по акведуку поступала в город. Водопроводный канал шел от Сухаревой башни до Самотеки, затем к Трубной площади и здесь выходил на поверхность земли. В конце пути вода сначала попадала в колодец, изливалась в каменный бассейн с павильоном, затем текла по чугунной трубе, на которой были устроены водоразборные фонтаны.



Рис. 15. Ростокинский акведук – гидротехническое сооружение Мытищинского водопровода, сохранившееся до наших дней

Мытищинский водопровод строился с 1779 по 1788 г. и потом до 1805-го — более 25 лет. Хотя воду по нему впервые дали осенью 1804 г., недостроенный водопровод постоянно нуждался в ремонте, потому что при его строительстве допустили серьезные технические ошибки. Кирпичный канал положили на деревянное основание, которое вскоре сгнило, в дальнейшем стали разрушаться ключевые бассейны, зимой произошло растрескивание кирпичной кладки

акведука, что вызвало утечку воды. Водопровод строили военные инженеры, офицеры и солдаты в отсутствие опытных инженеров, без геодезических инструментов и технической литературы. Таким образом, Мытищинский самотечный водопровод в целом представлял собой сооружение, технически неудачное и малоэффективное. Это стало особенно очевидным в первой половине XIX в.

### *Противопожарное обеспечение городов*

Русские города, выстроенные из дерева, на протяжении веков горели и часто даже полностью выгорали. Но в XVII в. начинают издаваться многочисленные царские указы воеводам разных городов о мерах безопасности и устройстве противопожарного водоснабжения. В городах создавались запасы воды в зданиях и сооружениях, строились специальные колодцы на случай пожара — в Москве, например, один колодец на каждые 10 дворов. В это же время в первопрестольной начинает работать фабрика заливных труб: во время пожаров вода по ним подавалась под напором. Началось производство пожарных насосов. В 1762 г. был издан указ «О содержании при всех домах в Санкт-Петербурге колодцев». После сильного пожара в 1771 г. в Петербурге вышел Указ о постройке каменных зданий.

### **Водоснабжение как индустрия**

Промышленная революция в Европе, повсеместное внедрение паровых машин, Великая французская буржуазная революция и провозглашение республики — все эти события, несомненно, оказали влияние на экономическое и политическое развитие России, в которой также происходит зарождение промышленного капитализма и постепенно разрушается крепостной строй (1770–1860 гг.). До реформы 1861 г. в государстве были в основном небольшие города с малочисленным населением. Даже в 1870-х гг. только 185 городов имело численность населения более 10 тыс. человек, 296 городских поселений — более 5 тыс. жителей. Численность населения в Петербурге — 668 тыс., Москве — 602 тыс., Варшаве — 252 тыс., Одессе — 121 тыс., Кишиневе — 104 тыс., Риге — 98 тыс., Саратове — 93 тыс., Киеве — 71 тыс., Туле — 58 тыс. человек и т. п.

До 1863 г. Петербург не имел даже признаков централизованного водоснабжения. Горожане пользовались водой из Невы и многочисленных протоков и шахтных колодцев. Водоносы обеспечивали горожан водой (вода из Невы — белые бочки, из водных протоков — зеленые). Началом создания городского централизованного водопровода считается 1858 г., когда Акционерное общество Санкт-Петербургских водопроводов представило проект водоснабжения центральной части города мощностью 1 млн 400 тыс. ведер в сутки (17 220 м<sup>3</sup>/сут). К 1876 г. четыре водопроводные станции с водозаборами и сетями снабжали водой все части Петербурга.

После реформы 1861 г., когда в России началось бурное развитие капитализма, число городов с населением 50 тыс. жителей и более в период



1863–1897 гг. утроилось. В этих условиях самотечные системы водоснабжения уже не удовлетворяли потребности в воде не только быстрорастущих городов, но и промышленности, которой чистая вода требовалась для технологических процессов и работы паровых котлов. Однако в результате деятельности заводов промышленными стоками сильно загрязнялись реки, каналы, пруды, озера, и с гигиенической точки зрения вода в них являлась далеко не безупречной.

Во второй половине XIX в. в России создаются технические предпосылки для устройства в городах централизованных систем водоснабжения с подъемом воды из источников: промышленность изготавливает оборудование, трубы, паровые котлы, машины, арматуру. На Петровских заводах еще на рубеже XVIII–XIX вв. начали изготавливать паровые машины. В России уже были инженеры, успевшие поработать в Европе и изучившие различные механизмы и типы так называемых огневых машин. Первые водопроводы, на которых были установлены паровые или поршневые машины с насосами двойного действия, работали в Кронштадте, в усадьбе Архангельское под Москвой, воду из реки пареоатмосферные машины поднимали в банях Трусова в Санкт-Петербурге.

Начиная со второй половины XIX в. централизованные водопроводы появляются в Одессе (1873 г.), Киеве (1870 г.), Харькове (1879 г.), Саратове (1857 и 1875 гг.), Ростове-на-Дону (1866 г.), Казани (1875 г.), Туле (1894 г.), Самаре (1886 г.), Твери (1865 г.), Царицыне (1890 г.)<sup>30</sup>. В большинстве случаев водопроводы той поры представляли собой подъем воды из источника и ее подачу с помощью паровых машин в городскую сеть, состоящую из чугунных и местами деревянных труб. Санитарное качество подаваемой населению воды оставалось неудовлетворительным, а потому постепенно на городских водокачках, как тогда называли водопроводные сооружения, стали строить медленные песчаные фильтры, где вода проходила очистку, хотя не всегда эффективно. К примеру, Саратовский водопровод, бравший воду из Волги и построенный английской акционерной компанией, имел медленные фильтры, но отведенные под них площади были небольшие. При образовании фильтрующей пленки их производительность снижалась, и тогда верхний слой намеренно повреждался ломом, что значительно ухудшало качество воды.

В начале 90-х гг. XIX в. городской централизованный водопровод Санкт-Петербурга включал в себя уличную сеть (более 320 верст) с линейными и пожарными кранами (более 3200 единиц), 41 водоем для отпуска воды в ручную посуду, 4 водопроводные станции, на которых было установлено 26 паровых машин низкого и высокого давления с 35 котлами мощностью 2110 индикаторных сил<sup>31</sup>. Главная водопроводная станция имела водозабор в 50 саженях от берега, оборудованный двумя 480-дюймовыми чугунными водоприемными трубами; сеточное здание, где вода проходила аэрацию перед фильтрами; медленные английские фильтры; резервуары чистой воды.

<sup>30</sup> Фальковский Н. И. История водоснабжения России.

<sup>31</sup> Индикаторная мощность двигателя внутреннего сгорания — мощность, развиваемая в рабочих цилиндрах в результате давления рабочего тела, действующего на поршень. Понятие индикаторной мощности применяется в теории паровых машин.

Во второй половине XIX в. устройство водопроводов для предприимчивых людей становится делом весьма доходным, что подтверждает появление множества концессионных компаний. Городские управления некоторых городов брали ссуды в банках и отдавали постройку водопровода на откуп отечественным или иностранным концессионерам. Однако последние не всегда оправдывали ожидания городов, дело доходило до судебных тяжб. Например, в Симбирске тяжба длилась между городским управлением и владельцами заводов братьев Струве 18 лет. В Ростове-на-Дону в 1860 г. было создано акционерное общество, озабоченное не столько постройкой водопровода, сколько выжиманием прибылей из городского населения и биржевыми махинациями с выпущенными акциями для устройства водоснабжения.

Однако было немало сторонников постройки водопроводов хозяйственным способом — когда город изыскивал для этого средства путем проведения облигационных займов. В 1872 г. Министерство внутренних дел, курировавшее хозяйственную и коммунальную деятельность городов, в связи с этим разослало по губерниям специальное письмо, которым устанавливался порядок согласования данного вопроса и заключения сделок на постройку водопровода между городами и предпринимателями.

Из архивных материалов о строительстве водопровода в уездном Царицыне<sup>32</sup>, к примеру, следует, что вначале городское общественное управление в лице председателя думы и городского головы обратилось с письмом к саратовскому губернатору. В нем излагалось обоснование необходимости устройства водоснабжения в городе, сообщалось о специально созданной водопроводной комиссии и предлагалось изыскать средства на постройку за счет проведения займа и выпуска облигаций. Губернатор в ответ просил представить ему расчеты, связанные с производительностью водопровода, план и смету предстоящих работ. Эти сведения требовались ему для подготовки доклада в Министерство финансов. После следовала бурная переписка со столичными чиновниками. Служащих хозяйственного департамента МВД интересовал расчет дохода, ожидаемого от эксплуатации водопровода: если данный расчет вдруг не оправдается, не окажется ли город перед необходимостью покрывать платежи по облигациям из текущих расходов в ущерб другим бюджетным статьям? Отношение царского правительства к ценным бумагам было серьезным, взвешенным. Таким же оказался и подход к делу постройки водопровода нового головы Царицына, который лично произвел расчеты, в результате чего сумма облигационного займа уменьшилась вдвое. Правительство, в свою очередь, утвердило первый выпуск царицынского городского облигационного шестипроцентного займа на 150 тыс. рублей с погашением в течение 43,5 лет. Вслед за этим Министерство финансов издало положение о приеме облигаций первого царицынского займа в залог по казенным подрядам и поставкам.

В целом на протяжении всего XIX в. водопроводы в России строились медленно еще и потому, что для провинциальных городов, веками пользовавшихся

<sup>32</sup> Данилина Л. И., Кузьмичев Ю. А. Чистой воды правда: опыт создания систем водоснабжения на территории Волгоградской области. — Волгоград, 2000.

колодцами с журавлями, это дело было совершенно новым. Отчасти это подтверждает опыт Москвы, где водопровод открылся 28 октября 1804 г., но вплоть до 1826 г. постоянно ремонтировался. В течение всей его истории выделяется три этапа реконструкции.

### *Реконструкция Мытищинского водопровода*

В 1826–1835 гг. инженер Николай Иванович Яниш значительно расширил водопроводную сеть в Москве. В 1829 г. по проекту Яниша в двух залах второго этажа башни были установлены чугунные резервуары, в которые поступала мытищинская вода и затем подавалась по всему городу. Оба резервуара соединялись тремя чугунными трубами, на которых имелось по одному крану с медной пробкой для перекрытия воды, курсировавшей между резервуарами. На месте, где оканчивался существовавший Мытищинский водопровод времен императрицы Екатерины II, Яниш в 1835 г. построил здание Алексеевской водоканчки с двумя паровыми водоподъемными машинами для подачи воды по чугунной трубе в Сухареву башню (рис. 16).



Рис. 16. Сухарева башня в Москве

От двух центральных распределительных колодцев у Сухаревой башни магистрали водопроводов расходились по городу в трех направлениях. Вода подавалась в том числе к Шереметьевскому, Никольскому, Петровскому, Воскресенскому и Варварскому водоразборным фонтанам.

В 1841 г. воду из Москвы-реки и Варварского фонтана провели в Московский императорский воспитательный дом<sup>33</sup>, где проживали дети-сироты. Это был один из первых успешных опытов внутридомового устройства водоснабжения: двумя насосами, работавшими от одной паровой машины, вода подавалась в количестве 266 л/мин в резервуары, которые располагались в верхней части дома. Аналогичное оборудование, как и два паровых котла, изготовили на заводе Шепелевых, и оно имелось в резерве. Всего запас питьевой воды составлял около 129 м<sup>3</sup>/сут. Общая протяженность свинцовых труб, проложенных по усадьбе и зданию, превышала 2,5 км. Поскольку мытищинской воды было недостаточно, для промывки ватерклозетов и стирки белья вода бралась из Москвы-реки. Насосы могли попеременно качать в отдельные емкости мытищинскую или москворецкую воду, для чего были установлены специальные запорные краны. Таким образом, в доме устроили «двойной водопровод»: речной, который при помощи специального сосуда забирал воду на расстоянии 11,8 м от набережной, и внутридомовой, обеспечивавший водой всех жителей Воспитательного дома, где также существовала и система канализации.

В 1853–1858 гг. выдающийся инженер барон Андрей Иванович Дельвиг (1813–1887) реконструировал старый водопровод на отрезке от Мытищ до Алексеевской водоканчки (рис. 17). Он считал, что водные источники Мытищ представляли собой значительный резерв для расширения водоснабжения Москвы. Из них можно было брать больше воды — не 330 тыс., а 550 тыс. ведер в сутки за счет нового понижения горизонта воды в старых ключевых бассейнах в Мытищах. Для этого кирпичную галерею от Мытищ до села Алексеевского заменили чугунным водоводом. В Мытищах построили водоканчку с установкой двух паровых машин для накачивания ключевой воды в верхний бак, размещенный в машинном здании. Далее вода из этого бака шла самотеком по новому водоводу к селу Алексеевскому.

В начале ноября 1858 г. воду впервые пустили в городские разборные водоемы трех видов: 21 открытый фонтан, два водонапорных закрытых бассейна и три водоразборных столбика. Город получал 600 тыс. ведер воды в сутки. Мытищинская вода стала подаваться к водоразборным фонтанам и в Замоскворечье — по проложенному под Москвой-рекой сифону<sup>34</sup>, из-за чего ощущался некоторый дефицит воды в левой части города<sup>35</sup>.

<sup>33</sup> Здание на Москворецкой набережной сохранилось до наших дней и является памятником архитектуры XVIII–XX вв. В нем располагается Военная академия ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого (Академия РВСН), которой постепенно отошла вся территория.

<sup>34</sup> Сифон (от древнегреч. σίφων «трубка, насос») — изогнутая трубка с коленами разной длины, по которой вода поступает из сосуда с более высоким уровнем в сосуд с более низким уровнем.

<sup>35</sup> Коммунальное водное хозяйство России: от водоразборных фонтанов — к технологиям XXI века: к 120-летию Первого Русского водопроводного съезда / сост. и шеф-ред. Е. А. Соболевская. — М. : Российская ассоциация водоснабжения и водоотведения, 2013.



Рис. 17. Водокачка у села Алексеевского

Переустройство и создание Нового Мытищинского водопровода в 1890–1893 гг. было поручено заведующему Московским водопроводом Николаю Петровичу Зимину (1849–1909). Имя этого выдающегося инженера было хорошо известно многим не только в Москве, но и в Самаре, Царицыне, Рыбинске, Тобольске, Тамбове, Шуе, Перми, где учрежденная им фирма «Нептун» успешно строила централизованные водопроводы.

Зимин сохранил схему водопровода Дельвига, дополнительно пробурил 50 скважин. Мощность водопровода была увеличена до 1500 тыс. ведер в сутки, усовершенствованы основные сооружения, поставлены современные паровые машины, построены две водонапорные башни, было проложено 116 км водопроводной сети диаметром 100–700 мм.

Новую уличную сеть трубопроводов проложили по кольцевой системе с созданием двух колец — по Садовой улице и по линии бульваров. Между кольцами и центром расположили распределительные сети. На сети сделали 17 переходов через реки — под железными дорогами, по мостам, туннелям и сифонам — частью чугунными, частью железными трубами. Было установлено 1007 пожарных кранов, 1194 колодца, 242 задвижки, 20 вантузов. Для отпуска воды в водовозные бочки и в мелкую посуду на улицах и площадях были установлены водоразборные будки, снабженные водомерами.

Мытищинская насосная станция нагнетала воду из водосборов в резервуар Алексеевской станции, которая перекачивала ее по чугунному водоводу в два резервуара, установленных в Крестовских башнях<sup>36</sup> (рис. 18). Назначение этих

<sup>36</sup> Крестовские водонапорные башни Мытищинского водопровода, построенные в 1890–1893 гг. архитектором М. К. Геппенером по заказу купца Н. А. Алексеява, были демонтированы в 1939 г. в связи с реконструкцией Ярославского шоссе.

башен было таким же, как и Алексеевского резервуара, — равномерно распределять подачу воды в город при эффективном использовании насосов, которые работали постоянно и с одинаковой скоростью в условиях неравномерного расхода воды в течение суток. За день резервуары выравняли неодинаковый часовой расход воды, к вечеру почти опорожняясь, а в ночь, в часы наименьшего разбора, вновь наполнялись.



*Рис. 18.* Крестовские башни — несохранившиеся водонапорные башни Мытищинского водопровода у начала Ярославского шоссе

Кроме того, водонапорные башни предназначались для создания в городской сети таких свободных напоров, при которых вода могла бы подниматься на верхние этажи зданий и при необходимости под давлением направляться для тушения пожаров. Именно Н. П. Зимин в 80-х гг. XIX в. предложил использовать воду из городской системы водоснабжения для тушения пожаров в Москве. Для этого он установил водопроводные трубы нужных размеров, разработал типы задвижек, колодцев и специальные вентили, которые при повышении давления в водопроводной сети позволяли отключать хозяйственное потребление воды и весь ее объем использовать для тушения пожара. Он также создал конструкцию подземного пожарного гидранта. Строительство противопожарных водопроводов оказалось важным и перспективным для многих городов, где на рубеже XIX–XX вв. преобладала деревянная застройка, а пожары были самым страшным бедствием.

Во время переустройства Мытищинского водопровода инженеры столкнулись с явлением гидравлического удара, приводившего к повреждению магистральных труб. По инициативе Зимина была создана специальная комиссия, к исследованию привлекли профессора Николая Егоровича Жуковского (1847–1921), «отца русской авиации». На территории Алексеевской водоканчки для этого построили опытную водопроводную сеть и сконструировали затвор гильотинного типа, который устанавливался в головке пожарного гидранта и позволял мгновенно рассекал поток воды в трубе. Проведенные опыты помогли Зимину провести обширные исследования по изучению потерь напора в трубах, пожарных рукавах, в свободных струях. Результаты этой работы Жуковский научно обобщил и изложил в своей знаменитой работе «О гидравлическом ударе в водопроводных трубах», впоследствии переведенной на многие языки.

В 1883 г. с началом электрификации в Москве появляются первые районные силовые электрические станции. Когда недалеко от Мытищ велось строительство Болшевской станции, встал вопрос о включении Мытищинского водопровода в число предприятий, подлежащих электрификации. На насосном узле на базе паровых котлов рядом с насосами были возведены небольшие электростанции, редукторы которых крутили пар паровых машин. Таким образом, на водопроводных сооружениях паровые насосы постепенно начинали дополняться электроредукторами, и надобность в паровых котлах постепенно отпадала.

К 1900 г. из Мытищ в Москву поступало около 3,5 млн ведер воды в сутки, а в отдельные дни подача достигала 4 млн ведер. Но усиленная откачка мытищинской воды вызвала значительное понижение уровня грунтовых вод в водозаборных колодцах и отрицательно сказалась на ее качестве: повышение жесткости воды подтвердили исследования, проведенные специально созданной комиссией, в состав которой входили крупнейшие ученые: В. И. Вернадский, Н. Д. Зелинский, Н. Е. Жуковский. Чтобы остановить дальнейшее ухудшение качества воды, Городская дума приняла решение об ограничении подачи воды из Мытищинского водопровода до 2 млн ведер в сутки. Однако в связи с бурным ростом промышленности и городского населения в Москве остро встал вопрос о поисках дополнительных водоисточников и постройке нового водопровода. В результате было принято решение, что единственным надежным источником для городского водоснабжения может служить только река Москва.

В период 1900–1903 гг. велись проектные, а затем и строительные работы. Полный облигационный капитал для Москворецкого водопровода на подачу 14 млн ведер в сутки был определен в сумме 41 млн 620 тыс. рублей. Руководить строительством был назначен 35-летний инженер Иван Михайлович Бирюков, уже имевший большой опыт работы по устройству различных водопроводных сооружений в Москве, Туле, станице Усть-Медведицкой. Водозабор, водоподъемные и очистные сооружения возводились на берегу реки Москвы, между деревнями Рублево и Луки, в местности, окруженной лесом, в 50 верстах от города (рис. 19).



Рис. 19. Рублевская водопроводная станция

Выше по течению реки не было ни промышленных предприятий, ни крупных населенных пунктов, которые могли бы загрязнять водоисточник. Расстояние до Воробьевых гор, где строился резервуар, было наименьшим — 14 верст. Полная мощность Москворецкого водопровода должна была составить 14 млн ведер воды в сутки, но так как сразу такого количества воды не требовалось, строительство было разделено на четыре очереди, по 3,5 млн ведер каждая. В соответствии с проектом постоянное машинное здание и оборудование для него могло быть готово только к 1903 г., а вода в Москве требовалась срочно, поэтому во временном машинном здании были установлены два насоса «Вейзе Монски» на подачу 600 тыс. ведер воды в сутки. Эти насосы и две небольшие воздуходувки — единственные машины зарубежного изготовления. Все постоянное оборудование было произведено на российских предприятиях: паровые машины, а потом и дизели, были изготовлены на Коломенском машиностроительном заводе.

Особое внимание уделялось качеству чугунных труб. На труболитейные заводы командировались представители водопровода, которые осматривали каждую трубу, присутствовали на их гидравлических испытаниях. После опрессовки трубы асфальтировались изнутри и снаружи. Поставщиками труб были Брянский, Нарвский заводы, завод братьев Бромлей и др. Песок для загрузки первых фильтров, в количестве 9700 м<sup>3</sup>, сушили на специальных печах, просеивали на самодельных сетчатых барабанах; гравий просеивали и отмывали на самодельных гравиемойках.

С вводом в эксплуатацию 27 июня 1903 г. Рублевской водопроводной станции в Москве впервые для питьевого водоснабжения стала использоваться вода поверхностного источника — Москвы-реки. Заведующий Московскими



водопроводами талантливый инженер Владимир Васильевич Ольденборгер (1863–1921) разработал проект электрификации Рублевской станции, которая воздушным проводом, как тогда говорили, была соединена с Каширской и Первой государственной электростанциями Москвы.

Новый Москворецкий водопровод работал по следующей схеме: вода из реки закачивалась в водоприемник, отстаивалась, проходила через медленные песчаные (английские) фильтры и подавалась по чугунному водопроводу в напорный резервуар на Воробьевых горах, который специально построили на самом высоком холме в столице. Далее питьевая вода самотеком поступала в магистральные трубопроводы, а из них — в городскую сеть. В 1906 г. станция перешла на ускоренный метод очистки воды — так называемый американский. Этот процесс, основанный на коагулировании (свертывании) примесей воды сульфатом алюминия, позволил ускорить ее очистку почти в восемь раз.



Рис. 20. Машинное здание Рублевской водопроводной станции

В 1914–1915 гг. в Рублеве было построено второе машинное здание (рис. 20), в котором вместо громоздких водоподъемных машин с плунжерными насосами к 1917 г. были установлены вертикальные дизели и центробежные насосы. С первых дней работы станции за качеством воды, отпускаемой в город, следила научная лаборатория. Ежедневно проводились: измерение температуры, определение прозрачности и бактериологические исследования речной воды, воды после отстойника, после предварительных фильтров, из 10 отделений английских фильтров и из сборного резервуара. Кроме того, два раза в месяц

определялись: взвешенные вещества, сухой остаток, окислы кальция и магния, кремнекислота, сумма окислов железа и алюминия, сульфаты, окисляемость, щелочность, хлориды, нитраты, нитриты, аммиак, общая жесткость. Таким образом, на Рублевской станции были заложены основы отечественной школы анализа воды<sup>37</sup>.

На рубеже XIX–XX вв. во многих городах Российской империи воду для жителей еще продолжали доставлять водовозы. Например, в Новосибирске в 1893 г. воду из реки Оби и ее притока Каменки, а также из шахтных колодцев и буровых скважин развозили на лошадях в бочках без какой-либо очистки (рис. 21).



Рис. 21. Водовозный промысел в Новосибирске

Для большинства городов и в первом десятилетии XX в. задача централизованного водоснабжения оказалась неосуществимой в основном из-за весьма ограниченных финансовых возможностей. И все же водопроводный вопрос в России с начала XX в. становится основополагающим для дальнейшего развития промышленных центров и городов. До революции 1917 г. Россия входила в пятерку самых развитых государств мира. В начале XX в. в империи насчитывалось 219 водопроводов.

### *Железнодорожное водоснабжение*

Открытие первой русской железной дороги из Петербурга в Царское Село в 1837 г. послужило началом развития в России железнодорожной сети, нуждавшейся в водоснабжении. На станциях возводились каменные водоподъемные

<sup>37</sup> *Порядин А. Ф.* Водозаборы в системах централизованного водоснабжения. — М.: Изд-во НУМЦ Госкомэкологии России, 1999.

здания (резервуары), по станциям прокладывались водопроводные трубы с кранами, устанавливались паровые машины, котлы, помпы (паровые насосы). Водоснабжение основывалось преимущественно на поверхностных водах, нередко для этих целей устраивались запруды. Вместимость напорных баков на станциях I и II классов составляла не менее 78 м<sup>3</sup>, на станциях III и IV классов — не менее 19 м<sup>3</sup>.

Водопроводная сеть на железнодорожном транспорте к 1880 г. достигала 2500 км. В основном были проложены чугунные раструбные трубы с заделкой свинцом. В то же время изучался вопрос о замене свинца цементом, асфальтом, каучуком и различными сплавами. При постройке станции на Петербурго-Варшавской железной дороге в 1859–1862 гг. воду провели в паровозное депо, вагонные мастерские, сараи, пассажирское здание. Для отведения атмосферных и хозяйственно-фекальных вод от всех главных зданий были проложены подземные водосточные трубы с кирпичными сводами, прорезавшие станцию в двух направлениях под прямым углом и выходявшие в Обводный канал. Длина канализационной сети составляла 4 км.

Развитие железных дорог привело к широкому устройству железнодорожно-го водоснабжения. К началу XX в. водопроводы действовали уже на 1977 железнодорожных станциях. Технически эти системы были просты и до Октябрьской революции 1917 г. мало усовершенствовались.

### *Русские водопроводные съезды*

Судьбоносным событием в развитии отрасли стал I Русский водопроводный съезд, прошедший в Москве в марте 1893 г. В его работе участвовали делегаты почти из 40 городов Российской империи: Москвы, Санкт-Петербурга, Богородска, Варшавы, Владикавказа, Владимира, Воронежа, Вильно (Вильнюса), Гродно, Двинска (Даугавпилса), Екатеринославля (Днепра), Елисаветграда (Кировограда), Иваново-Вознесенска (Иванова), Казани, Киева, Козлова (Мичуринска), Костромы, Минска, Нарвы, Нахичевани, Нижнего Новгорода, Новочеркаска, Одессы, Орла, Подольска, Пензы, Риги, Ростова-на-Дону, Самары, Саратова, Севастополя, Смоленска, Тифлиса (Тбилиси), Тулы, Харькова, Херсона, Царицына (Волгограда), Шуи, Ярославля<sup>38</sup>.

На съезде было создано Водопроводное бюро — постоянно действующий орган съездов, издающий с 1911 г. специализированный журнал «Известия Русских водопроводных съездов». До Октябрьской революции русские водопроводные съезды проходили каждые два года: в Москве (1893, 1905 гг.), Варшаве (1895 г.), Петербурге (1897, 1907 гг.), Одессе (1899 г.), Киеве (1901 г.), Нижнем Новгороде (1903 г.), Тифлисе (1909 г.), Риге (1911 г.).

Основы конструирования и строительства водопроводов, принципы очистки и обеззараживания питьевой воды, устройство водозаборов из подземных и поверхностных источников, организация эксплуатации — эти и множество других вопросов включались в повестку заседаний съездов, а их решения по

<sup>38</sup> Фальковский Н. И. История водоснабжения России.

сути явились программными документами развития коммунального водного хозяйства городов и других населенных пунктов страны. Так, в 1909 г. на IX съезде в Тифлисе было одобрено предложение по обеззараживанию питьевой воды хлором, а в 1910 г. впервые в России воду начали хлорировать на водопроводе Кронштадта.

На съездах постоянно поднимались вопросы санитарно-эпидемиологической надежности централизованных систем водоснабжения. Во многих преимущественно провинциальных городах России всерьез даже не задумывались о том, что вместе с водой, к примеру, могут передаваться возбудители холеры, хотя на эту тему в Англии в 1854 г. уже были опубликованы работы лондонского врача Джона Сноу. Но лишь с научными исследованиями этого явления немецким врачом, микробиологом и гигиенистом Робертом Кохом (1843–1910) стало очевидным, что водный фактор является определяющим в возникновении эпидемий холеры, брюшного тифа, дизентерии и, как следствие, высокой смертности населения, вызванной этими заболеваниями. С созданием централизованных систем водоснабжения уровень смертности в городах стал резко снижаться. Сами съезды объединяли не только ученых и инженеров водопроводного дела, но и гигиенистов, санитарных врачей. Своим зарождением отечественная школа гигиенистов обязана одному из основателей гигиены в России профессору Московского университета Федору Федоровичу Эрисману (1842–1915). Именно он основал в Москве городскую санитарную лабораторию, разрабатывал санитарные вопросы строительства московского водопровода, канализации, полей орошения.

Для повсеместного развития централизованного водоснабжения требовались инженерные кадры. Их подготовкой занялся открывшийся в 1895 г. Петербургский институт путей сообщения, где впервые в России была создана специальная кафедра — «Водоснабжение и водостоки». В связи с развитием железнодорожного транспорта здесь намного раньше, чем в других учебных заведениях той поры, начали преподавать основы строительства и эксплуатации водопроводов. Подготовка профильных кадров гигиенистов осуществлялась в высших учебных заведениях медицинского профиля.

Технологии приготовления питьевой воды в России прошли многовековой путь становления и эволюционного развития. Водоподготовка как подотрасль водопроводного хозяйства начала свое становление еще в древние века, и ее развитие было обусловлено социальным и промышленным развитием городов и поселений в целом. С развитием общества менялись приоритеты, но это всегда было повышение качества приготовления питьевой воды и улучшение ее характеристик.

### **Водоснабжение: техника и технологии в исторической ретроспективе**

В своей истории Россия за последнее столетие проделала путь от страны с рыночной экономикой в начале XX в. до общества с распределительной плановой экономикой в его середине (1918–1991 гг.) и в 1991 г. вернулась в условия рынка. Развитие водного хозяйства и его технологий в рассматриваемый период было

обусловлено сменой общественно-экономических формаций, революциями, войнами, периодами восстановления народного хозяйства страны и другими внутренними и внешними событиями.

В становлении системы управления водным хозяйством с XX в. до наших дней выделяют советский этап (1917–1990 гг.), переходный (1991–2003 гг.) и современный. Данная периодизация объясняется тем, что после Великой Октябрьской социалистической революции 1917 г. было образовано новое государство — Российская Советская Федеративная Социалистическая Республика (РСФСР), в 1922 г. вошедшая в состав Союза Советских Социалистических Республик (СССР). В 1991 г. в связи с распадом СССР была провозглашена независимость Российской Федерации.

### *Водоснабжение в первые годы советской власти*

Ситуация с водоснабжением в России после Октябрьской революции заметно осложнилась в силу ряда причин. В период Гражданской войны (1917–1922 гг.) водопроводы подверглись разрушению; многие специалисты, которые их обслуживали, были призваны на фронт, те же, кто оставался, вынуждены были работать в условиях жесточайшего дефицита оборудования, вызванного в том числе национализацией предприятий (1922–1923 гг.). До революции они в основном были частными и выпускали для нужд водоснабжения и канализации трубы, арматуру, насосы и прочее оборудование. Национализация коснулась и водопроводов, ранее принадлежавших городским управлениям, частным лицам и компаниям: отныне административное и техническое руководство системами водоснабжения передавалось управлениям, которые подчинялись коммунальным отделам исполкомов губернских советов.

Во время Гражданской войны проблема водоснабжения обострилась еще и потому, что в стране распространялись холера, тиф и другие заболевания, от которых умирали тысячи людей. Причиной этого была грязная либо недостаточно очищенная вода. Чтобы остановить эпидемии, местным советам в 1918 г. было предложено организовать работу по хлорированию питьевой воды на тех станциях, где вода проходила очистку.

В марте 1921 г. Совет Народных Комиссаров издал декрет «О мерах по улучшению водоснабжения, канализации и ассенизации в Республике», которым признал особую важность работы учреждений по водоснабжению, канализации, ассенизации и постановил откомандировать из армии по месту пребывания бывших рабочих и служащих водопроводных, канализационных и ассенизационных предприятий и учреждений. Этот фактор сыграл важную роль в восстановлении водопроводного хозяйства в 1922–1923 гг. Например, в Томске, где в годы Гражданской войны из строя было выведено более половины домовых вводов, в 1922 г. их количество увеличилось в 1,4 раза в сравнении с 1921 г., в 1924 г. — в 1,7 раза. Возобновилась подача воды в городскую сеть, превысив этот показатель за 1917 г. В Новосибирске воду из реки качали насосами, далее из водоразборных будок водовозы доставляли ее горожанам. Если в 1923 г. насчитывалось семь водокачек, то в 1926 г. их эксплуатировалось уже 16.

Похожая ситуация складывалась и в других городах. За первые 10 лет Советской власти в стране было построено более 100 новых городских водопроводов (рис. 22) и проведена работа по установлению водоохраных зон источников водоснабжения.



Рис. 22. Строительство водопровода в Екатеринбурге

### *План ГОЭЛРО и развитие водоснабжения*

Принятый в 1920 г. план электрификации России ГОЭЛРО<sup>39</sup> стал основой комплексного использования водных ресурсов для нужд народного хозяйства. Он предусматривал развитие не только энергетики, но и всей экономики страны в целях укрепления ее обороноспособности. Начавшаяся в 1930-х гг. индустриализация дала мощный импульс развитию систем водоснабжения и водоотведения в довоенном СССР — строительству каналов, водохранилищ, водоподъемных, регулирующих плотин, водопроводных и канализационных сетей, водопроводных станций. Не только в центральных областях страны, но и на Северном Кавказе (Грозный, Краснодар), Урале (Свердловск, Челябинск, Магнитогорск), в Сибири и на Дальнем Востоке (Новосибирск, Кемерово, Иркутск, Красноярск, Владивосток) возводились крупные заводы и около них моногорода с системами централизованного водоснабжения (рис. 23) и водоотведения.

К 1940 г. численность городского населения в стране достигла 38 млн человек (в два раза больше по сравнению с 1917 г.), в связи с этим более чем в два раза увеличились объемы водопотребления. Всего было построено 9 тыс. малых и средних заводов, около 170 крупных промышленных объектов. В условиях роста водопотребления требовались мощные водозаборы, практика строительства которых также берет свое начало в 1930-х гг. В это время проводились

<sup>39</sup> ГОЭЛРО (сокр. от Государственная комиссия по электрификации России) — государственный план электрификации Советской России, ставший первым перспективным планом развития экономики, принятым и реализованным в стране после Октябрьской революции 1917 г.

эксперименты и натурные исследования по открытым водозаборам в Кузбассе, на Урале, Волге, Дону, после чего водозаборы строились на Иртыше, Северной Двине, Оби, Томи, Енисее, Ангаре, Амуре. Для нужд железнодорожного водоснабжения в Омской области был построен уникальный по тому времени продольный водопровод протяженностью 113 км с водозабором из Иртыша. Проведение воды на столь дальнее расстояние объяснялось отсутствием обилия других источников.

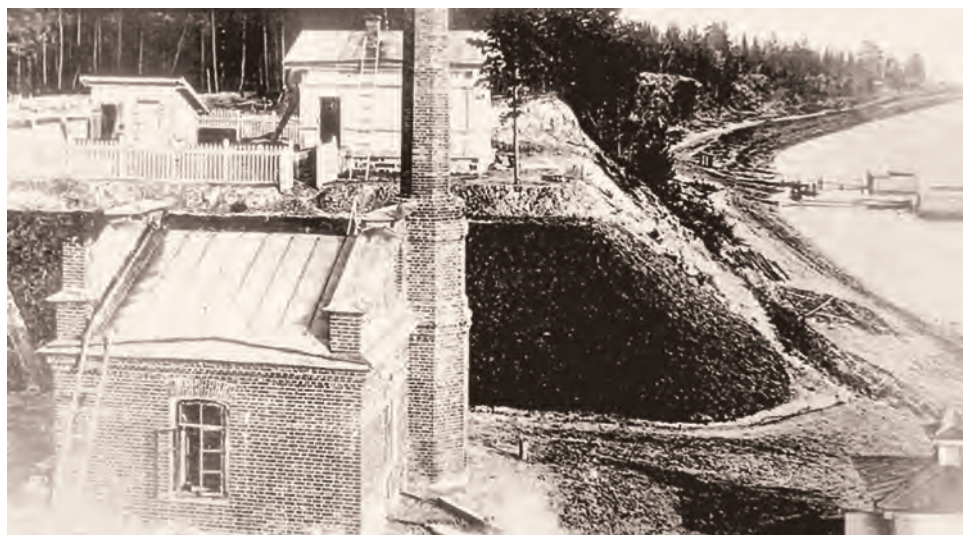


Рис. 23. Водоканка в Новосибирске

В Западной и Восточной Сибири только за 1926–1928 гг. было построено 917 колодцев, 167 прудов, пробурено около 4 тыс. разведочных скважин со средней глубиной 15 м. Устраивались обычные срубные и реже трубчатые колодцы. Но особенно сложным обеспечение населения водой было в районах Севера, где обычным делом было заготовление льда, который в летние месяцы в процессе таяния давал 6–7 л/сут на человека. Поиск подземных вод в районах вечной мерзлоты был затруднительным, но воды, формировавшиеся в подземных таликах крупных непромерзающих рек, сохранялись там благодаря теплоте воздействию речного потока. На основании аллювиальных<sup>40</sup> и подмерзлотных подземных вод создавалось водоснабжение в Якутске, Алдане, Нерюнгри и других населенных пунктах.

Развитие водопроводных систем крупных промышленных городов в 1920–1930-е гг. зачастую не поспевало за стремительным ростом промышленности

<sup>40</sup> Аллювий (лат. *alluviō* — нанос, намыв) — несцементированные отложения постоянных водных потоков (рек, ручьев), состоящие из валунов, гальки, песка, гравия, суглинка, глины. Аллювиальные воды — подземная вода в слое аллювиальных отложений русла реки. Толщина водоудерживающего слоя в зависимости от толщины аллювиальных отложений в крупных реках достигает 15 м, в некоторых местах — 30–50 м.

и жилья. Это особенно наглядно проявлялось на примере Москвы, где в 1926–1935 гг. для увеличения водности Москвы-реки были построены плотины на реке Истре и у поселка Рублево, очистные сооружения у села Черепково близ Рублево. Хотя к 1935 г. благодаря созданной системе водоснабжения город дополнительно получил 450 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в условиях индустриализации столице требовалось воды в два раза больше. Для решения этой важной задачи был разработан и принят генеральный план развития Москвы, в соответствии с которым началось активное строительство канала Москва–Волга (сегодня — Канал имени Москвы) и Сталинской водопроводной станции (сегодня — Восточная). С их вводом в эксплуатацию в Москву должна была прийти волжская вода<sup>41</sup>.

На фоне строившихся по всей стране водопроводных станций, в основе работы которых была двухступенчатая технология очистки воды (отстаивание и фильтрование преимущественно с одним типом коагулянта — сульфатом алюминия, горизонтальными или вертикальными отстойниками, скорыми открытыми или напорными фильтрами с кварцевой загрузкой и обеззараживанием хлором), Сталинская (Восточная) станция производительностью 600 тыс. м<sup>3</sup>/сут стала для того времени грандиозным технологическим прорывом. В акте комиссии, принимавшей станцию, отмечалось, что по своей мощности она — наибольшая среди водопроводных станций Европы, по установленному стандарту очищенной воды — наиболее совершенная в Европе и США. При ее создании за основу брался опыт эксплуатации Рублевской станции. Участие ее специалистов при запуске было очень важным, потому что перед ними стояла задача по созданию новых режимов очистки воды. На момент пуска в состав сооружений станции входили: регулирующий бассейн («ковш»), в который поступала вода, подводившаяся к станции по водопроводному каналу; насосные станции I и II подъема (оснащенные шестью горизонтальными центробежными насосами производительностью 1,92 м<sup>3</sup>/с типа «Лимакс» французского производства, спаренные с синхронными двигателями); смеситель с камерой реакции; четыре отстойника; 46 скорых фильтров; контактный резервуар; пять резервуаров питьевой воды и другие сооружения. На станции предусматривались: механическая очистка воды на вращающихся сетках, затем предварительное хлорирование до поступления воды на очистные сооружения, коагулирование, известкование, отстаивание, фильтрация воды через скорые открытые фильтры и вторичное хлорирование. Из машинного зала в город вода подавалась по четырем водоводам общей длиной 40 км: три водовода — из железобетонных труб диаметром 1200 мм, четвертый — из чугунных труб диаметром 900 мм.

Коагулянт «Мутта» Московского глиноземного завода им. Войкова доставлялся на Восточную по железнодорожной ветке. Далее его выгружали в вагонетки и по рельсам вручную перевозили на склад, где для приготовления раствора он измельчался, после чего его заливали в смеситель. Из-за того что естественной щелочности воды для проведения реакции с серноокислым

<sup>41</sup> Восточная в интерьере эпохи : книга очерков / ред.-сост. А. М. Пономаренко, Е. В. Шушкевич, С. А. Алексеенков, Ю. С. Дмитриева и др. — М. : Современная полиграфия, 2017.



глиноземом было недостаточно, воду иногда подщелачивали, поэтому на станции предусматривалась возможность известкования: в здании коагулирования работал цех, где готовилось известковое молоко, которое с помощью насосов закачивалось в рабочие баки на третьем этаже. Вода смешивалась с реагентами в аванкамере смесителя — в ней реагенты попадали в воду, потом в камеры быстрого смешивания (перемешивание воды с раствором коагулянта) и камеры реакции (при медленном движении заканчивается реакция реагентов и примесей). После коагулирования вода через переливную перегородку распределялась в отстойниках, объем каждого из которых равнялся 27 тыс. м<sup>3</sup>.

После отстаивания вода проходила через фильтрацию (рис. 24) на американских фильтрах безмешалочного типа — за счет подачи воды под напором. Для измерения скорости фильтрации изначально использовались водомеры Сименса, Вентури, однако в начале 1950-х гг. первую схему автоматизации промывки и регулирования скорости фильтрации разработал один из инженеров релейно-измерительного цеха Восточной станции А. В. Лабутин. Основным элементом схемы был плоский четырехходовой шайбовый кран, управляемый компаундными (составными — от англ. *compound*) электродвигателями, включаемыми по схеме динамического торможения. Система автоматического управления производила все операции по переключению фильтров с цикла фильтрации на цикл промывки и обратно. Этот кран изготовили на московском заводе «Водоприбор». В 1951 г. коллектив под руководством А. В. Лабутина был удостоен Государственной премии СССР за разработку схемы автоматизации промывки фильтров и регулировки скоростей фильтрации.



Рис. 24. Зал фильтров на Восточной станции в Москве

Отечественные и зарубежные специалисты, в том числе из мэрии Лондона, приезжали на Восточную станцию для ознакомления с ее работой. Англичане, к примеру, были удивлены использованием на Восточной кранов-смесителей для подачи воды: вплоть до 1960-х гг. в системах водоснабжения в их стране существовали два крана — на холодную и отдельно на горячую воду. В курсе новаций, применявшихся на Восточной, был даже премьер-министр Великобритании У. Черчилль.

Развитие питьевого водоснабжения к 1940 г. не только в Москве, но и в других городах способствовало резкому росту мощности и протяженности сетей коммунальных водопроводов (в Алтайском крае — в 2 раза, во Владивостоке — в 4,5 раза). В предвоенные годы создавалось и промышленное водоснабжение — на Кузнецком металлургическом и Магнитогорском комбинатах, заводе «Амурсталь» в Комсомольске-на-Амуре, Новосибирском заводе сельского машиностроения, Кемеровской и Новокузнецкой ТЭЦ. В среднем стоимость промышленного водоснабжения составляла около 5 % от общего строительства промпредприятий.

### *Водопроводное хозяйство в годы Великой Отечественной войны*

До начала Великой Отечественной войны централизованным водоснабжением в СССР было обеспечено 512 городов, канализацией — 193. Только в период 1938–1940 гг. водопроводы были построены в 28, системы канализации — в 12 городах. В сельской местности данные объекты в эти годы практически не строились.

С началом войны города, имевшие централизованное водоснабжение, разделились на две группы: часть оказалась в зоне ведения боевых действий, часть — в тылу. В городах первой группы водопроводы приравнивали к особо важным предприятиям оборонного значения, что предусматривало выделение им дополнительного транспорта, ремонтных средств, введение особого режима водообеспечения бомбоубежищ, госпиталей, пунктов санитарной обработки, пожаротушения.

В Москве, например, были развернуты системы резервного водоснабжения, рассчитанные на тушение пожаров, строились речные насосные станции, запасные артезианские скважины, дублирующие водопроводные сети, сотни копаных водоемов. В Ленинграде подготовили к работе 10 дублирующих водозаборных установок общей мощностью 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут (треть от суточной подачи), пять плавучих водозаборных устройств-рефулеров, сформировали отдельный водопроводно-канализационный восстановительный батальон. Все это позволило снабжать город водой в блокадные годы.

Для водоснабжения промышленных предприятий, эвакуированных на Урал, в Поволжье и Сибирь, строились дополнительные водозаборы и насосные станции, временные водопроводы нередко прокладывались по поверхности земли, без заглубления. В связи с дефицитом реагентов воду для питьевых целей обеззараживали раствором хлорной извести и дополнительно применяли аммиачный раствор, а впоследствии — аммиак из баллонов.

Вражеская авиация первым делом стремилась вывести из строя водопроводные станции, резервуары чистой воды, насосные отделения, водоводы, уличные сети. В таких условиях бесперебойная подача воды населению и на нужды промышленности достигалась ценой невероятных усилий и человеческих жертв (рис. 25). В Ленинграде во время блокады погибло 882 работника водопровода<sup>42</sup>. На главную водопроводную станцию здесь было сброшено 55 фугасных бомб, на территории Южной станции разорвалось 955 снарядов.

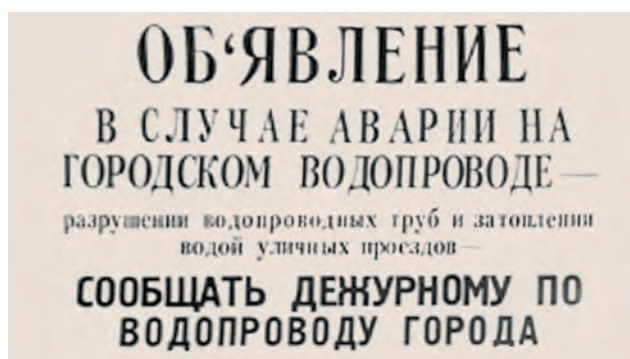


Рис. 25. Объявление в блокадном Ленинграде.

Такие объявления, развешанные по всему городу, сообщали номера телефонов, по которым нужно было звонить в случае разрушений на водопроводе.

Источник: ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

В городе на Неве сильно страдала уличная сеть, из-за разрушения которой затопливались улицы, площади, подвалы домов. Зимой 1941–1942 гг. внутридомовые сети не выдерживали сильных морозов и замерзали. В то же время городская сеть работала бесперебойно, за исключением 25 и 26 января, когда в Ленинграде полностью была отключена подача электроэнергии.

В Подмосковье, отступая из района Истры, фашисты взорвали гребень Истринской земляной плотины, мост через водосброс, заминировали подступы к сооружению. В сильную стужу рабочие Московского водопровода вместе с местным населением восстановили плотину, и весной 1942 г. водохранилище было заполнено, что позволило обеспечить водой Рублевскую станцию. В юго-западной части Восточной станции располагалось помещение, где на случай отключения электроэнергии держали резерв из паровых насосов. Во время войны этот объект служил ложной целью для немецких летчиков. После каждой бомбардировки рабочие станции тут же восстанавливали здание, красили фанеру, картон. Благодаря этой ложной цели удалось сохранить насосную станцию первого подъема, которая не пострадала и работала всю войну.

Во многих городах водопроводное хозяйство оказалось сильно разрушено, а в Сталинграде — вообще уничтожено. Приехавшая из Москвы в город на Волге бригада работников Восточной водопроводной станции обеспечивала

<sup>42</sup> Водоснабжение Санкт-Петербурга.

жителям доступ к воде родников, ручьев и ключей: лаборанты обрабатывали места каждого такого источника хлорной известью и постоянно осуществляли лабораторный контроль воды.

Институт «Гипрокоммунводоканал» разработал проекты по восстановлению водопроводов 16 городов: Курска, Орла, Сталинграда, Воронежа и др. Задачи по возрождению систем водоснабжения в таких больших масштабах решались впервые не только в отечественной, но и в мировой практике. Прямой ущерб от разрушения 1710 городов и поселков в СССР оценивался в 225 млрд рублей (в прежнем масштабе цен). Значительную долю составляли городские системы водоснабжения. С 1946 по 1960 г. водопроводы были восстановлены и построены в 580 больших и малых городах.

### *Водоснабжение в период массового жилищного строительства*

После восстановительного этапа (1945–1950 гг.) и периода постепенного подъема в водоснабжении (1950–1960 гг.) интенсивное развитие хозяйственно-питьевого водоснабжения и канализации пришлось на 1960–1990 гг. Оно сопровождалось большими капиталовложениями в черную металлургию и трубопрокатное производство. К 1960-м гг. отечественная промышленность перестала выпускать чугунные трубы, вместо них производились только стальные, причем из некачественной низколегированной стали без антикоррозийной защиты. Они повсеместно использовались при прокладке коммуникаций водоснабжения. В эти же годы впервые была поставлена задача создания в стране производства железобетонных и асбестоцементных труб, увеличения выпуска насосно-энергетического и санитарно-технического оборудования. Отметим, что широко используемый за рубежом в те годы метод нанесения покрытия из цементно-песчаных растворов на стальные и чугунные трубы впервые применили в 1968 г. в Москве — для защиты стального водовода внутренним диаметром 1200 мм (3-й Краснопресненский водовод). В течение последующих 30 лет эксплуатации данного водовода на saniрованном участке проводились эксперименты по оценке эффективности и долговечности нанесенного покрытия, а также перспективности его выбора для столицы<sup>43</sup>.

Проектированием крупных городов в эти годы занимался институт «Гипрогор»<sup>44</sup>. Основываясь на его проектах, Совет Министров СССР утверждал задания по разработке систем водоснабжения и водоотведения. В корректировке планов участвовала Академия коммунального хозяйства РСФСР, на местах проекты готовили филиалы института «Гипрокоммунводоканал». Особое внимание при этом уделялось стандартам качества питьевой воды. В 1937 г. под руководством выдающегося ученого-гигиениста А. Н. Сысина (1879–1956) в СССР

<sup>43</sup> В 1983 г. аналогичные работы по защите цементно-песчаным покрытием участка стального водовода диаметром 1220 мм и протяженностью 14 км были проведены в Анапе. В течение 17 лет проводились наблюдения за состоянием цементно-песчаного покрытия и замеры качества транспортируемой воды. Толщина нанесенного покрытия за годы эксплуатации не изменилась, качество воды оставалось стабильным.

<sup>44</sup> *Порядин А. Ф.* Водозаборы в системах централизованного водоснабжения.

впервые был разработан «Временный стандарт на качество питьевой воды». Ни в одной стране Европы, например, таких стандартов еще не существовало. В 1939 г. нарком здравоохранения и нарком коммунального хозяйства РСФСР издали «Временный стандарт качества питьевой воды, подаваемой в сеть хозяйственно-питьевых водопроводов», ставший основой для всех последующих ГОСТов на качество питьевой воды.

В 1940 г. был утвержден новый стандарт качества питьевой воды — ГОСТ 2874-45 «Вода питьевая», признавший важность дифференцированного подхода к оценке качества питьевой воды и воды источников. В 1954 г. стандарт качества питьевой воды пересмотрели, и по поручению Главной санитарной инспекции Министерства здравоохранения СССР на воду был разработан ГОСТ 2874-54 и введены нормативы для таких тяжелых металлов, как бериллий, молибден, стабильный стронций, селен, а также для фтора (ввиду доказательства прямого влияния его содержания в питьевой воде на возникновение зубного кариеса). Позднее, в 1973 г., был утвержден ГОСТ 2874-73 «Вода питьевая» — основной норматив качества для подаваемой водопроводной воды, в 1977 г. — ГОСТ 17.1.3.03-77 «Правила выбора и оценка качества источников хозяйственно-питьевого водоснабжения». В 1982 г. на смену предшественникам был принят ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством».

В советское время в сфере водоснабжения была создана отечественная инженерно-технологическая школа, наработки которой заложили прочный фундамент для дальнейшего развития водной техники и технологий. Огромный вклад в эту работу внесли такие ученые, как основоположник отечественной школы по расчету надежности систем водоснабжения Н. Н. Абрамов (1901–1988), Д. М. Минц (1914–1973) — очистка природных вод, фильтравание, В. В. Найденко (1938–2005) — исследования по инженерной экологии, С. А. Шуберт (1918–2004) — разработка технологий глубокой очистки сильно загрязненных природных вод, Ф. А. Шевелев (1912–1998) — гидравлический расчет водопроводных труб, или «Таблицы Шевелева», на основании которых водопроводы проектируются по сей день.

В СССР успешно работали ученые-гидравлики: Н. Н. Павловский (1884–1937), И. И. Никурадзе (1894–1979), Н. К. Чижов (1865–1935). Учение о водозаборах из поверхностных источников, разработка их конструкций и технологии были заложены в 1950–1970-х гг. и успешно развиты учеными А. А. Суриным, А. С. Образовским, А. Ф. Порядиным и др.

Строительство объектов водоснабжения и канализации в 1960–1970-е гг. объявлялось приоритетным еще на стадии планирования, благодаря чему централизованное водоснабжение получили 860 городов и рабочих поселков. В результате мощность городских водопроводов увеличилась на 12 млн м<sup>3</sup>/сут, а протяженность водопроводных сетей и водоводов — на 25 тыс. км. Этому в огромной степени способствовало строительство каналов и водохранилищ в разных районах страны. Для увеличения водоснабжения Москвы были построены Можайское (1960–1961 гг.), Рузское (1965–1966 гг.) и Озернинское (1967 г.) водохранилища.

В Восточном Казахстане соорудили канал Иртыш–Караганда протяженностью 500 км. Вода из реки Иртыш системой насосных станций и шлюзов поступала на высоту 400 м для обеспечения потребности в воде города Тёмиртау и сталелитейного Карагандинского комбината, являвшегося одним из крупнейших металлургических предприятий в СССР.

В этот период началось строительство канала Днепр–Донбасс протяженностью 550 км и пропускной способностью 125 м<sup>3</sup>/с для обеспечения водой Донбасса, не имевшего достаточных поверхностных и подземных источников водоснабжения. В 1976 г. в Белоруссии благодаря созданию Вилейско–Минской водной системы значительно улучшилось водообеспечение промышленных предприятий Минска, при этом для питьевого водоснабжения сохранялись ценные подземные воды. Проблемы водоснабжения курортов Южного берега Крыма решались передачей вод с северных склонов Крымских гор; был построен водопровод с забором из Кубань–Калаусского оросительного канала для снабжения водой городов-курортов Кавказских Минеральных Вод.

Интенсивное развитие систем водоснабжения в СССР предопределило повсеместное строительство водозаборов большой производительности благодаря новым технологическим средствам и выпуску мощного насосно-энергетического оборудования, запорной и регулирующей арматуры, средств управления и автоматики. В эти годы на многих водозаборных сооружениях были внедрены сверхнадежные погружные насосы. На использование такого оборудования разрабатывались нормативные документы (СНиПы, ГОСТы и т. д.). Более 30 типов водоприемных оголовков применялось в различных гидрологических природно-климатических условиях.

Но наиболее сложным в условиях Севера являлось устройство русловых водозаборов на Лене, Колыме, Алдане, Якокуте, Огодже, Ангаре. Здесь широко применялся метод послонного вымораживания воды и грунта с установкой железобетонных оголовков, использовались водозаборы инфильтрационные и с фильтрующими водоприемниками, которые в меньшей степени подвержены шуголедовому воздействию, обладают хорошими рыбозащитными свойствами и улучшают качество воды при ее отборе. Для защиты от обмерзания к водоприемным окнам береговых и русловых водозаборов подавалась нагретая до 25°С вода из расчета подогрева забираемой воды до 0,5°С. Электрообогрев имели и сороудерживающие решетки на водоприемном оголовке, а к окнам с целью защиты от шуги подавался сжатый воздух. Для строительства водозаборов на Севере использовались лесоматериалы: дерево в меньшей степени подвержено внутриводному обледенению, чем металл и бетон.

Своя специфика существовала и при прокладке трубопроводов, которые были из стали и соединялись сварными стыками. Специально была создана незамерзающая арматура, благодаря которой поверхностная прокладка труб значительно упростилась. Начиная с 1940-х гг. велась также совмещенная прокладка коммуникаций в каналах: в верхнем ярусе канала укладывались теплофикационные трубы, в нижнем — водопроводные и канализационные. Такие каналы были построены в Якутске и Норильске.

Однако быстрый рост городов с расширением территорий, предназначавшихся под застройку, деятельность промышленных предприятий, как правило,

напрямую сбрасывавших свои неочищенные сточные воды в водоемы, недостаточно эффективная очистка хозяйственно-бытовых стоков, отводившихся в водоисточники, — все это способствовало резкому ухудшению экологической обстановки в районах водозаборов и пересмотру ранее разработанных проектных решений по развитию водопроводов. По этой причине водозаборы пришлось удалять на многие десятки километров от населенных пунктов в Иванове, Ижевске, Владивостоке, Саранске. В некоторых случаях водозаборы даже пришлось строить на новых водоисточниках: в Ташкенте, Перми, Ярославле, Рыбинске, Омске и других городах. Загрязнение источников воды вызвало необходимость расширения перечня веществ, подлежащих удалению из природных вод в процессе подготовки воды для хозяйственно-питьевых нужд: фитопланктон, запахи, привкусы, соли тяжелых металлов, хлорорганические соединения, остаточный алюминий, пестициды, поверхностно-активные вещества.

Ведущие исследовательские институты (ВНИИ ВОДГЕО, СоюзводоканалНИИпроект, Академия коммунального хозяйства, Всесоюзный научно-исследовательский институт экологии и гигиены окружающей среды, имевший филиалы во всех 15 республиках бывшего Союза) в те годы не могли обеспечить инновационного прорыва в развитии и внедрении технологий подготовки питьевой воды. Проектные работы и прикладные исследования выполнялись лишь в направлении интенсификации работы традиционных гидравлических смесителей, камер хлопьеобразования, отстойников и фильтров. Для серьезного переоснащения водохозяйственной отрасли не хватало энергетических мощностей, финансирования и экологической базы, поэтому разрабатываемые относительно новые технологии и технические средства внедрялись крайне редко и в основном в столичных городах, которые по существу были первопроходцами в использовании новых технологий.

В 1957 г. на Восточной водопроводной станции в Москве начались исследования по применению озона в процессе обеззараживания воды (рис. 26). Как сильный окислитель он должен был улучшить органолептические свойства волжской воды, которой были присущи болотно-тинистые запахи и привкусы, усиливавшиеся в отдельные годы. В результате была разработана технология двухступенчатого озонирования и построена озонаторная станция. В комплекс озонаторных сооружений входили блок первичного озонирования (1975 г.) и два блока вторичного озонирования (1977 и 1978 гг.).

Изначально озон применялся только на последней стадии обработки воды, в основном для обеззараживания. Впоследствии от применения вторичного озонирования решили отказаться и использовать эти блоки для проведения хлораммонизации<sup>45</sup>. В процессе эксплуатации выяснилось, что часть вырабатываемого озона не успевает прореагировать с водой, и даже система рекуперации

<sup>45</sup> Аммонизация воды — комбинированный метод очистки сырой воды, суть которого заключается в обработке водных масс аммиаком или солями аммония в комбинации с хлорированием. Применяется для закрепления эффекта активного хлора, продления обеззараживающего эффекта и предотвращения образования в водной среде хлорорганических соединений, придающих питьевой воде крайне неприятные привкусы и запахи.

(вторичного использования воды) не позволяет сильно снизить содержание озона в выбрасываемом воздухе до предельно допустимой концентрации. В результате изысканий (впервые в мировой практике) в 1993 г. в таком масштабе была разработана и применена установка каталитического разложения озона, эффективность которой достигала 98%. В 1999 г. с увеличением количества воды, обрабатываемой Восточной станцией, произвели реконструкцию электропитания озонаторов с увеличением частоты до 650 Гц, что позволило довести выработку озона только на блоке первичного озонирования до 200 кг/ч. Это был передовой опыт использования озона в процессе подготовки питьевой воды в промышленных масштабах.



Рис. 26. Генераторы озона на Восточной станции водоподготовки в Москве

В 1971 г. Верховный Совет СССР принял закон «Об утверждении основ водного законодательства», который стал историческим основополагающим документом, регламентировавшим общий порядок и ключевые правила водопользования. Все водные ресурсы объявлялись собственностью государства. Устанавливался порядок учета природных источников воды, составления схем их комплексного и наиболее рационального использования для нужд народного хозяйства. На основании этого закона развитие водного хозяйства в 1970–1980-е гг. осуществлялось по трем основным направлениям:

- регулирование стока — строительство водохранилищ;
- межбассейновое перераспределение водных ресурсов — переброска стока из многоводных бассейнов в маловодные;
- применение комплекса мероприятий, направленных на экономное расходование воды: повторное использование сбросных вод, строительство очистных сооружений и др.



Законодательно объявленный курс на экономное расходование воды в реальности был малоосуществимым. В соревновании двух экономических систем — социалистической и капиталистической — достаточное и доступное снабжение населения водой преподносилось Советским Союзом как одно из значимых преимуществ социалистической плановой экономики: по удельной обеспеченности централизованным водоснабжением и водоотведением СССР в те годы обошел Европу. Так, средний уровень водопотребления на одного человека достигал 327 л/сут. Централизованным водоснабжением было охвачено 99 % городов и 86 % поселков, водопроводной водой пользовалось более 70 % населения страны. При этом производство 1 м<sup>3</sup> чистой воды стоило всего 2 копейки — столько же, сколько стакан газированной воды в уличном автомате.

Для интенсивного развития хозяйственно-питьевого водоснабжения повсеместно применялись материалы и технологии, которые сокращали сроки возведения объектов. Так, во время строительства Западной станции в Москве производительностью 800 тыс. м<sup>3</sup>/сут вместо монолитных железобетонных конструкций использовались сборные строительные конструкции, что в два раза уменьшало сроки строительства. В то же время для перекачки огромных объемов воды для этой станции специально были спроектированы и изготовлены на Уральском заводе высокопроизводительные гидромашины, вертикальные центробежные насосные агрегаты, развивающие напор силой до 100 м. Для подачи воды со станции в возвышенный по рельефу район Коньково впервые в практике Московского водопровода была сооружена насосная станция третьего подъема. Таким образом, построенный Коньковский регулирующей узел обеспечивал подачу 1 млн м<sup>3</sup>/сут воды в самотечном режиме в южные и юго-западные районы столицы.

В начале 1970-х гг. для дальнейшего увеличения водоснабжения столицы было решено построить Юго-Западную водопроводную станцию. Специально для этого в Смоленской области соорудили Вазузскую гидротехническую систему и плотину, образовавшую водохранилище с объемом до 540 млн м<sup>3</sup>. Две насосные станции, связанные каналом, позволили преодолеть Москворецко-Вазузский водораздел и перекачивать в верховья реки Рузы и в Москворецкий бассейн дополнительно около 1,5 млн м<sup>3</sup> волжской воды в сутки, которая требовалась для будущей станции. В практике ее проектирования смесители, отстойники и фильтры были объединены в единый блок, что позволило сократить площадь застройки и повысить оперативность эксплуатационного обслуживания.

В 1970–1980-х гг. в деятельности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства произошло знаковое событие: многолетняя практика структурного и организационного разделения предприятий водоснабжения и канализации на отдельно работавшие тресты, управления и прочие формы хозяйствования завершилась объединением и созданием на их основе *водоканалов*. Сферой их ответственности стало предоставление услуг населению по надежному водоснабжению и водоотведению на всем пути следования воды — от водозабора на источнике до водовыпуска на канализационных очистных сооружениях.

В 1980-х и начале 1990-х гг. коммунальное хозяйство находилось в состоянии кризиса, при котором рост эксплуатационных затрат превышал рост инфляции. Остаточный принцип финансирования, доминировавший в условиях плановой экономики, привел к физическому и моральному износу инженерных систем, сооружений, оборудования, к которым относились трубопроводы и установленная на них арматура. Так, большая часть трубопроводов в водоснабжении городов была проложена и оплачена предыдущими поколениями. В начале XX в. трубы производились из серого чугуна, срок их службы составлял 80–100 лет. Если их доля в общем объеме в 1920 г. равнялась 27%, то в 1940 г. — 83%, а в 1960-м снизилась до 60%. При этом с началом бурного жилищного строительства, как уже ранее отмечалось, их производство прекратилось. Повсеместно укладывались стальные трубы, срок службы которых был рассчитан на 20 лет, т. е. время их износа совпало с годами перестройки: эффективность использования этих труб падала, бюджетных средств на их замену не хватало. В результате из-за утечек полезный отпуск воды по некоторым городам снижался до 80%.

### *Современный период*

В конце 1991 г. изменения, связанные с проведением экономических реформ, требовали модификации водопроводно-канализационного хозяйства. В связи с провозглашенным в начале 1990-х гг. переходом к рыночной экономике многое стало меняться в деятельности водоканалов. К примеру, водоканал города Новокузнецка стал первым в стране арендным предприятием коммунального хозяйства, где активно внедрялась идеология бережливого производства, затрагивавшая как процессы производственного цикла, так и управление предприятием. В результате качество подаваемой потребителям воды приблизилось к более высоким европейским стандартам, исчезли пресловутые графики подачи холодной воды, в течение суток стали устраняться аварии. Аренда в данном случае стала для водоканала инструментом, позволившим впоследствии освободиться от старых инструкций и нормативов и начать жить по законам рыночной экономики.

В 1990-х гг. был осуществлен переход от политики неукротимого роста водопотребления к рациональному использованию воды. В огромной степени этому способствовал выход в 1994 г. Постановления Правительства РФ № 505, которым запрещалось принимать в эксплуатацию квартиры после капремонта или строительства без приборов учета воды. В 1996 г. был издан Федеральный закон РФ «Об энергосбережении», которым в целях ведения расчета с ресурсоснабжающими организациями населению рекомендовалось использовать индивидуальные приборы учета. В 2012 г. вступившая в силу норма закона «Об энергосбережении» (Федеральный закон от 23.11.2009 г. № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ») требовала обязательной установки счетчиков воды во всех квартирах тех домов, где было централизованное водоснабжение. Данные документы стали основополагающими для начала работы водоканалов по коммерческому учету отпускаемой потребителям воды.

В 1992–1999 гг. Госдума РФ приняла законы «Об охране окружающей среды», «Об охране атмосферного воздуха» и другие природоохранные нормативные правовые акты. Вследствие этого в структурах водоканалов были созданы подразделения по экологической безопасности. После вступления в 2006 г. в силу нового Водного кодекса Российской Федерации были внесены значительные изменения в государственное управление и охрану водных объектов, выработаны механизмы по осуществлению эффективной государственной политики в сфере водного хозяйства, в том числе использованию принципов интегрированного управления водными ресурсами.

Переломным моментом в 1990-х гг. с принятием новых СанПиН 2.1.4.559-96 и 2.1.4.1074-01 стало ужесточение нормативов качества воды для централизованных систем водоснабжения. Впервые вводилось нормирование хлороформа, ужесточение по эпидемической безопасности (нормирование вирусного и паразитарного загрязнений). Также был принят норматив на окисляемость 5 мг O<sub>2</sub>/л. В 2003 г. Гигиеническим нормативом 2.1.5.1315-03 устанавливалось ужесточение по хлороформу (0,1 мг/л) и алюминию (0,2 мг/л), а в 2007 г. содержание хлороформа должно было быть доведено до 0,06 мг/л Гигиеническим нормативом 2.1.5.2280-07.

В условиях выполнения новых требований к качеству питьевой воды водоканалы стали работать над совершенствованием технологий и внедрением новых схем и методов подготовки воды. В начале «нулевых» этому способствовали постепенный экономический рост и расширение внешнеторговых связей, возникновение конкуренции на отечественном рынке, производство новых материалов и технологий и т. п. Например, в 1990-х гг. Научно-производственное объединение «Лаборатория импульсной техники» (НПО «ЛИТ») приступило к разработке и установке на предприятиях водопроводно-канализационной отрасли систем ультрафиолетового обеззараживания воды<sup>46</sup>. Холдинг «Пенетрон» начал выпускать гидроизоляционные материалы, группа «Полипластик» — напорные системы холодного водоснабжения на основе полиэтиленовых труб. Свое дальнейшее развитие получили производства по выпуску коагулянтов и флокулянтов (оксихлорида алюминия и его разновидности, синтетических полиэлектролитов (СПОЭ) катионного, анионного и неионного типов), изготовлению более экономичных установок для получения электролитическим методом раствора гипохлорита натрия, озонирования, высокоэффективных с точки зрения глубокой доочистки питьевой воды мембранных и сорбционных сооружений и установок.

Водоканал Санкт-Петербурга принял программу реконструкции и развития систем водоснабжения города на 2004–2011 гг., в которой ставилась задача достижения европейских показателей качества питьевой воды, в первую очередь по бактериологическим показателям. В городе существовала проблема с заболеваемостью населения гепатитом А, передававшимся водным путем.

<sup>46</sup> УФ-обеззараживание воды — метод, использующийся в комплексной водоподготовке. Основная функция, которую выполняют системы обеззараживания воды ультрафиолетом, — удаление бактерий и других болезнетворных микроорганизмов.

Для ее решения Водоканал Санкт-Петербурга в 2004–2008 гг. создал и запустил в эксплуатацию самый крупный в мире УФ-комплекс обеззараживания воды. В системе водоподготовки было установлено девять УФ-станций единичной производительности от 0,3 до 1,5 млн м<sup>3</sup>/сут, которые обеспечили дополнительное обеззараживание воды ультрафиолетом с целью устранения вирусных загрязнений. В эти же годы Водоканал Санкт-Петербурга перешел на обеззараживание воды гипохлоритом натрия<sup>47</sup> вместо жидкого хлора, стал применять контактные осветлители и мембранные фильтры, а также более безопасный реагент — сульфат аммония вместо аммиака для аммонирования воды в процессе водоподготовки. Это повысило уровень безопасности работы водопроводных станций Санкт-Петербурга и сняло риск возникновения чрезвычайных ситуаций. В настоящее время на всех водозаборах города действует система биомониторинга с использованием речных раков, на панцирях которых прикреплены датчики, регистрирующие их кардиоритм с подачей сигнала диспетчерам. По данным местного управления Роспотребнадзора, благодаря реализованным в системе водоснабжения мероприятиям заболеваемость гепатитом А в Санкт-Петербурге с 2004 по 2009 г. снизилась в 16 раз.

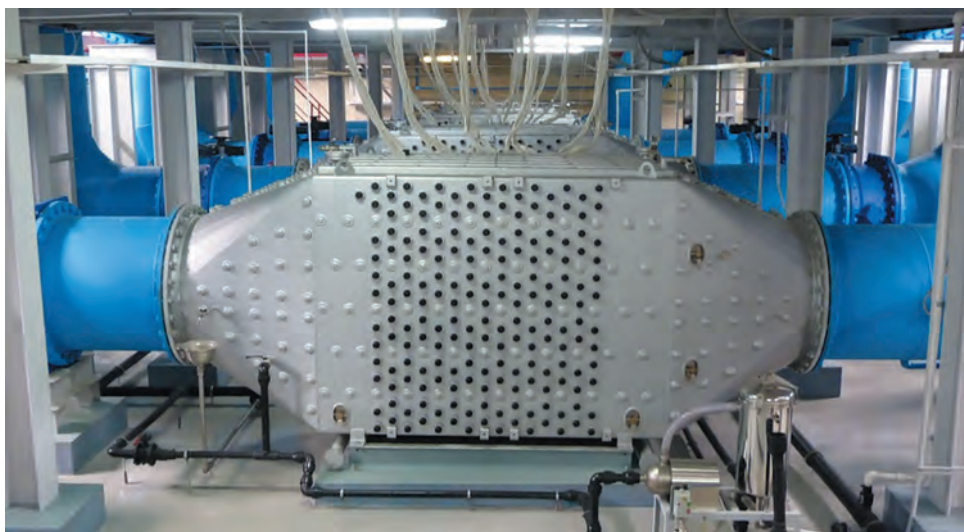


Рис. 27. Ультрафиолетовое обеззараживание воды на насосно-фильтровальной станции МУП «Горводоканал» Новосибирска

Новосибирск стал вторым после Санкт-Петербурга городом, где в 2013 г. полностью была реализована программа обеззараживания воды ультрафиолетом (рис. 27). Построенные здесь станции УФ-обеззараживания позволили полностью замкнуть цикл обработки всей воды ультрафиолетом — как перед

<sup>47</sup> Гипохлорит натрия представляет собой химическое соединение с формулой NaOCl или NaClO, включающее в себя катион натрия (Na<sup>+</sup>) и гипохлоритный анион (OCl<sup>-</sup> или ClO<sup>-</sup>). Это соединение можно рассматривать как соль неустойчивой хлорноватистой кислоты.

подачей питьевой воды населению, так и в процессе очистки сточных вод. На сооружениях водоподготовки МУП «Горводоканал» еще в 2010 г. перед камерами хлопьеобразования отстойников были установлены дополнительные смесительные устройства — флокуляторы<sup>48</sup> (рис. 28) и диспергаторы<sup>49</sup>. Благодаря этим запатентованным техническим решениям хлопьеобразование частиц загрязнений и реагентов происходит в два этапа: быстрое — в устройстве для флокулирования, медленное — в существующей камере хлопьеобразования. Применение флокуляторов позволяет при малой мутности речной воды ускорить процесс хлопьеобразования, что повышает качество обрабатываемой воды после блока отстойников.

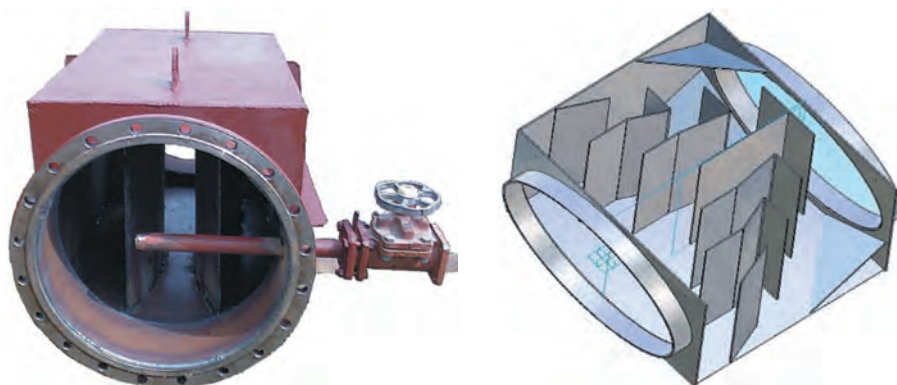


Рис. 28. Флокулятор (внешний вид и схема)

Станции водоподготовки Мосводоканала в целях достижения новых СанПиНов и гигиенических нормативов пошли по пути дополнения классической технологии очистки воды процессами озонирования и сорбции на активированном угле. Благодаря озонсорбции вода лучше очищается от химических загрязнений, устраняются неприятные запахи и привкусы, происходит дополнительное обеззараживание.

В технологическую схему Юго-Западной станции производительностью 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут, которая была введена в эксплуатацию в 2006 г., включена стадия мембранного фильтрования на ультрафильтрационных модулях (рис. 29).

<sup>48</sup> Флокулятор — дополнительное смесительное устройство, устанавливаемое на входе в существующую камеру хлопьеобразования, основанное на создании зон вращательного движения потоков, которые возникают в корпусе устройства.

<sup>49</sup> Диспергатор — смеситель для мгновенного смешивания реагентов с водой. Принцип работы такого смесителя основан на ударе плоской струи с определенной скоростью о преграду, при этом весь поток делится на несколько плоских потоков в соплах диспергатора. Конструкция смесителя позволяет производить полное смешение малых количеств растворов реагентов во всем объеме обрабатываемой воды практически мгновенно. Реагенты подаются непосредственно в диспергатор, для работы смесителя используется энергия потока и не требуется дополнительных источников энергии. Конструкция диспергатора проста, и он может быть встроен в подающий водовод вместо существующего на станциях смесителя либо работать с ним в паре.



Рис. 29. Ультрафильтрационные мембраны на Юго-Западной станции водоподготовки Москвы

Уникальность данной станции заключается в том, что впервые в отечественной практике водоподготовки были применены все современные способы очистки воды: первичное озонирование, коагулирование, корректировка pH, флокулирование, отстаивание, вторичное озонирование, обработка порошкообразным активированным углем, фильтрование через двухслойные фильтры (антрацит–песок), вторичная обработка порошкообразным активированным углем, ультрафильтрация, хлораммонизация. При необходимости вода также может обеззараживаться гипохлоритом натрия. Таким образом, этот перспективный метод очистки воды обеспечивает задержание микрочастиц размером до 0,01 микрона — вирусов, бактерий, паразитарных организмов, крупных молекул органических веществ — при сохранении солевого состава природной воды.

Применение Мосводоканалом инновационных технологий исключает влияние сезонных изменений качества природной воды, обеспечивает надежную дезодорацию питьевой воды, ее гарантированную эпидемиологическую безопасность даже в случаях аварийного загрязнения источника водоснабжения. Объем воды, подготовленный с применением новых технологий, в Москве в настоящее время составляет около 60% всей обрабатываемой воды.

Водоканал Екатеринбурга применяет безнапорную ультрафильтрацию для очистки промывных вод на своей Западной фильтровальной станции. Одной из серьезных технологических проблем здесь было большое количество использования воды на собственные нужды. Для ее решения предприятие выбрало технологию обработки промывной воды на ультрафильтрационных мембранах

и возврат ее в качестве питьевой воды населению. При этом качество воды по основным показателям после ультрафильтрации значительно выше, чем при классической схеме водообработки. Технологическая схема включает в себя подготовку промывной воды, ее механическую очистку, ультрафильтрацию и обработку осадка. Комплекс оборудования состоит из резервуаров-усреднителей, механических фильтров (самопромывных), камер флокуляции и дозирования реагентов (добавляются коагулянты полиалюминий гидрохлорид и перманганат калия), трубопроводов, насосов, индукционных измерителей, приемного отделения ультрафильтрации и секции обработки осадка водоподготовки (рис. 30). После внедрения данной технологии в производство предприятие значительно снизило расход воды на собственные нужды — с 20 до 4%. Соответственно забор воды для получения того же объема питьевой воды тоже снизился более чем на 15%. Кроме этого, уменьшилось количество реагентов, используемых для обработки этой воды. Таким образом, Водоканал Екатеринбурга получил значимый экономический эффект.



Рис. 30. Западная фильтровальная станция в Екатеринбурге с технологией ультрафильтрации промывной воды.  
Источник: МУП «Водоканал», Екатеринбург

В последние годы не только в столичных, но и во многих городах страны водоканалы исключили из обращения жидкий хлор и стали применять для обеззараживания воды гипохлорит натрия. Эта мера нацелена в первую очередь

на повышение надежности и безопасности производства питьевой воды: при использовании гипохлорита натрия риск возникновения чрезвычайных ситуаций и их последствий несоизмеримо ниже, чем при использовании жидкого хлора. И хлор, и гипохлорит натрия при попадании в воду образуют хлорноватистую кислоту, участвующую непосредственно в процессах уничтожения микробиологических загрязнений. Именно этим объясняется схожее обеззараживающее действие двух реагентов.

Поскольку гипохлорит натрия применяется в виде разбавленного раствора, в питьевой воде образуется меньшее количество побочных продуктов, чем при использовании жидкого хлора. Согласно проведенным исследованиям, количество хлорорганических соединений после обработки гипохлоритом натрия по сравнению с фоновым содержанием либо не увеличивается, либо они появляются в ничтожно малых количествах, не превышающих нормы ПДК. В связи с ужесточением государственного норматива на содержание в питьевой воде хлороформа на московских станциях водоподготовки, к примеру, были отработаны режимы обеззараживания воды, в результате чего концентрация хлороформа в водопроводной воде, по средним данным за 2020 г., не превысила 7–14 мкг/л при нормативе 60 мкг/л.

В системе Мосводоканала обеззараживание воды гипохлоритом натрия осуществляется с добавлением аммиаксодержащего реагента, который в условиях протяженной распределительной сети обеспечивает длительное действие бактерицидных свойств хлора независимо от наличия в технологической схеме озонирования воды. Такая практика типична не только для Москвы, но и для других крупных городов мира, имеющих протяженную водопроводную сеть: Парижа, Лондона, Токио и др. Озон в отличие от хлорсодержащих реагентов — нестойкое соединение, быстро разлагающееся в воде, что объясняет его ограниченное применение для заключительного обеззараживания лишь в небольших городах и более широкое использование на промежуточных этапах очистки воды.

В Троицком и Новомосковском административных округах Москвы источниками водоснабжения в большинстве случаев являются артезианские скважины. Применяемые технологические схемы очистки артезианских вод индивидуальны и подбираются для каждого объекта с учетом особенностей качества воды эксплуатируемых водоносных горизонтов. Около половины водозаборных узлов здесь подает воду, которая проходит следующие ступени очистки: обезжелезивание, умягчение, кондиционирование на угольных сорбционных фильтрах, удаление примесей тяжелых металлов, обеззараживание гипохлоритом натрия либо с использованием ультрафиолетовых ламп.

Если XX в. принято считать эпохой инфраструктурного развития городов России, то в начале XXI в. главной задачей после более чем 100-летнего развития современного типового водоснабжения стало восстановление и обновление водопроводных сетей, от состояния которых в большой степени зависит качество подаваемой потребителям питьевой воды. В прошлом остался открытый способ прокладки трубопроводов, увеличивавший стоимость работ и сроки их выполнения, приводивший к разрушению дорожных покрытий



и т. п. На смену ему пришли современные методы и технологии бестраншейного восстановления (санации) и прокладки водопроводных трубопроводов<sup>50</sup>. И хотя впервые ознакомление российских инженеров с зарубежным опытом их применения пришлось на конец 1980-х и начало 1990-х гг., широко их стали использовать в отечественной практике лишь в последние десятилетия. Существует международная и принятая в России классификация повреждений, согласно которой подземные трубопроводы подвергаются санации путем нанесения на их внутреннюю поверхность таких защитных покрытий, как сплошные набрызгивания (цементно-песчаные покрытия и др.); протяжки полимерных гибких оболочек или пластиковых труб с сохранением или разрушением старого трубопровода; нанесения спиральных (наливка полимерных профильных лент на внутреннюю поверхность трубы), точечных покрытий и т. п.

Применение различных современных методов восстановления трубопроводов позволяет вернуть в активную эксплуатацию потерявшие работоспособность коммуникации, увеличить не только срок их службы минимум на 50 лет, но и пропускную способность и, что особенно важно, сохранить высокое качество транспортируемой воды, снизить количество аварий, минимизировать непроизводительные потери воды.

Чтобы избежать повторного загрязнения питьевой воды, с середины 1990-х гг. сначала в Москве и Санкт-Петербурге, а затем и в других крупных городах при прокладке и замене устаревших труб из серого чугуна, стали, железобетона, керамики, асбестоцемента стали использоваться трубы нового поколения — из полимерных материалов (пластмассовые), а также из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ВЧШГ), обладающие высокой прочностью, герметичностью, износостойкостью, простотой в эксплуатации и при монтаже. Так, срок службы труб из ВЧШГ составляет от 80 до 100 лет, что превышает срок эксплуатации стальных в 4–5 раз. Нередко при прокладке новых труб используется метод «труба в трубе с разрушением», когда старые бетонные, керамические, чугунные или асбестоцементные трубы с помощью специальных инструментов разбиваются на части и выдавливаются в грунт, а новые чугунные или стальные трубы, с внутренним защитным слоем из цементно-песчаной смеси и с внешней стороны защищенные цинком, битумом или цементно-песчаным покрытием, протягиваются на место старых (рис. 31). Развиваются сети оборотного и повторного водоснабжения, особенно актуальные для промышленных предприятий, расходующих много воды.

Для качественного водоснабжения применяются современное оборудование и арматура, не требующая обустройства колодцев или рытья траншей, — шаровые краны в подземном исполнении, различные виды задвижек, выполненных из новых материалов. Все чаще используются быстрозастывающие покрытия трубопроводов на основе полиуретановых смол, направленные на устранение утечек.

<sup>50</sup> Под бестраншейными технологиями понимаются технологии прокладки, ремонта, инспекции и обнаружения дефектов в подземных коммуникациях различного назначения с минимальным вскрытием земной поверхности.



Рис. 31. Прокладка современных трубопроводов



Рис. 32. Теледиагностика сетей

Современную эксплуатацию трубопроводов в водоснабжении сегодня невозможно представить без их диагностического обследования (рис. 32), которое начало применяться в системе водоснабжения и водоотведения с конца 1990-х гг. Оно проводится в первую очередь на сетях с повышенной повреждаемостью и истекшим сроком службы.

Контроль до и после реконструкции трубопроводов осуществляется телероботом (рис. 33), который представляет собой перемещающийся в трубе транспортный модуль на колесном, гусеничном ходу, на салазках или плавающий. Помимо камер на телероботах располагаются ремонтные головки (заделочная или бандажная). Телероботы управляются по кабелю (длиной до 150 м) оператором из специального микроавтобуса, оснащенного аппаратурой, кабельным барабаном, подъемником, бортовым компьютером, видеосистемой, генератором, устройством очистки и связи и другим оборудованием. Телеробот полностью герметичен и может работать в частично заполненных водой трубопроводах. Как правило, телероботы используются до и после промывки сетей, при приемке нового трубопровода от строителей, перед санацией, при поиске мест повреждения, при проверке труб и определении места утечки воды, когда нет возможности применить другие методы.



Рис. 33. Телероботы

В 2016 г. вступил в действие Свод правил 249.1325800.2016 «Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами», в котором были объединены требования к разным технологиям реконструкции подземных инженерных коммуникаций, на стадии проектирования была предусмотрена оценка влияния строительства на окружающую среду и другие важные положения проведения ремонтных работ, в том числе и коммуникаций водопроводно-канализационной сферы.

По какому пути пойдет дальнейшее технологическое развитие отечественной отрасли водоснабжения, исходя из накопленного опыта последних лет, — предмет дискуссий ученых, специалистов, производителей оборудования. Но на первое место уже выходит такая глобальная задача, как сбережение водных ресурсов — их экономное расходование, сокращение водоканалами производственных потерь и минимизация непроизводственных расходов. Особенно актуальной эта тема в последние годы стала для южных регионов России, где наблюдается маловодье, нехватка воды необходимого качества для питьевых нужд. Специалисты отрасли считают, что дальнейшее развитие и применение на водоканалах получают такие технологии очистки воды, как нанофильтрация и обратный осмос. Возможно даже, в будущем станет реальным их массовое внедрение и использование.

Еще одним важным вектором развития отрасли станут автоматизация и информатизация производственных процессов деятельности предприятий водопроводно-канализационного хозяйства.

В настоящее время активно развиваются и внедряются так называемые интеллектуальные системы, позволяющие анализировать, обрабатывать и хранить информацию, выявлять закономерности, моделировать, рассчитывать и проектировать<sup>51</sup>. Особенно актуально использование интеллектуальных компьютерных систем в химии, химической технологии и экологии, описание в которых включает в себя сотни и тысячи структурных элементов и их связей.

Интеллектуальные системы можно разделить на следующие типы:

- системы, основанные на знаниях;
- вычислительные системы;
- гибридные системы;
- программные инструменты моделирования и автоматизированного проектирования.

*Системы, основанные на знаниях:*

- системы, основанные на правилах (экспертные системы);
- системы, основанные на прецедентах.

*Вычислительные системы* или инструменты могут базироваться на нейронных сетях, нечеткой логике, генетических алгоритмах, статистических методах, теории хаоса и т. д.

*Гибридные системы* соединяют в себе различные типы систем, основанных на правилах, и элементы вычислительных систем. Например, в состав гибридной системы могут входить нейронные сети, генетические алгоритмы, экспертные системы.

*Программные инструменты моделирования и автоматизированного проектирования* — это коммерческие (как правило) пакеты программ, которые разрабатываются для общих случаев, но могут быть адаптированы для моделирования и проектирования как отдельных аппаратов, так и схем в целом.

---

<sup>51</sup> Колесников В. А. и др. Оборудование, технологии и проектирование систем очистки сточных вод. — М. : ДеЛи плюс, 2016.

Специалисты станций водоподготовки уже сегодня в режиме онлайн видят на мониторах компьютеров все этапы прохождения воды в процессе ее очистки и подготовки (рис. 34).



Рис. 34. Центральное диспетчерское управление Мосводоканала

*Концепция создания Автоматизированной интеллектуальной системы управления технологией производства питьевой воды*

- Разработка и внедрение автоматизированной системы управления технологией водоподготовки на основе применения измерительно-вычислительных комплексов, использующих информацию о качестве измеряемой среды, поступающую в режиме реального времени, в качестве критериев для оценки текущей эффективности технологических процессов.
- Изменение традиционной концепции способа управления процессами производства питьевой воды путем изменения (пересмотра) набора значимых управленческих параметров.
- Создание новой парадигмы надежности и безопасности питьевого водоснабжения.
- Разработка методологии интеграции современного аналитического оборудования для контроля качества воды в автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУТП) водоподготовки.

Важнейшей задачей водоснабжения является гарантированное обеспечение населения питьевой водой, качество которой отвечает требованиям санитарного законодательства. Наряду с обязательствами ресурсоснабжающей организации перед потребителем в части качества питьевой воды требуется управлять производственным процессом, исключая случаи непроизводительных затрат.

Основная сложность создания интеллектуальной системы управления сводится к тому, что производство питьевой воды имеет комбинированный характер зависимостей, что расширяет задачи при описании технологических процессов<sup>52</sup>. Внедрение автоматизированной системы интеллектуального управления производством позволит:

- стабилизировать эксплуатационные показатели технологического оборудования и оптимизировать режимные параметры технологических процессов;
- диагностировать и предупреждать возникновение аварийных ситуаций;
- повысить производительность и качество продукции;
- создать системы быстрого планирования основных показателей;
- усовершенствовать эффективность использования оборудования и контрольно-измерительных приборов;
- уменьшить количество случаев ухудшения качества воды, число жалоб абонентов на качество;
- снизить влияние человеческого фактора на технологический процесс;
- диагностировать и определять причины отклонений параметров процесса от желаемых значений;
- решать задачи мониторинга состояния оборудования;
- иметь возможность построения виртуальных датчиков;
- решать задачи стабилизации и оптимизации целевых показателей эффективности процессов.

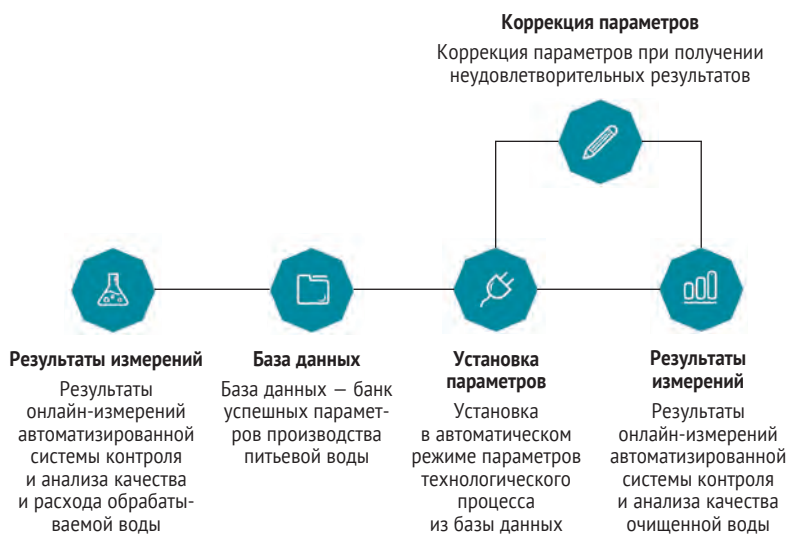


Рис. 35. Алгоритм функционирования Автоматизированной интеллектуальной системы управления технологией производства питьевой воды

<sup>52</sup> ООО «Аква Вита». Автоматизированная система интеллектуального управления технологическим процессом на объектах водоподготовки. Описание программы базы данных производственного процесса водоподготовки. 35533253.425290.001.И4.02. 24 л.

Алгоритм функционирования Автоматизированной интеллектуальной системы управления технологией производства питьевой воды (рис. 35) предусматривает этапы:

- 1) непрерывный контроль качества и расхода обрабатываемой воды;
- 2) на основании результатов этапа 1 формируется запрос базы данных для выбора наилучших параметров процесса водоподготовки;
- 3) информация о выбранных параметрах направляется исполнительным механизмам;
- 4) после установки выбранных параметров с учетом времени инерции процесса система собирает результаты приборных измерений качества очищенной воды;
- 5) при получении удовлетворительных результатов цикл повторяется с этапа 1, при ином результате с помощью измерительно-вычислительных комплексов выполняется коррекция параметров водоподготовки.

#### *Измерительно-вычислительные комплексы*

При создании автоматизированных интеллектуальных систем управления технологическими процессами водоподготовки, способных автоматически корректировать, например, дозы реагентов в зависимости от текущего качества воды, использование результатов дискретных лабораторных определений не представляется возможным.

В таких системах (рис. 36) следует опираться на результаты онлайн-измерений при условии их достоверности — высокой степени соответствия измеренных величин их истинному или принятому опорному значению<sup>53</sup>.

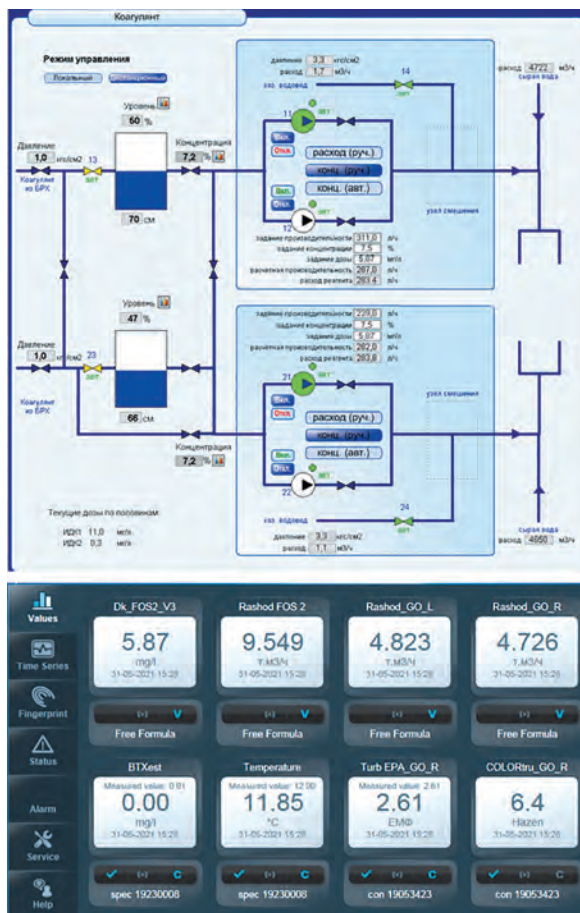
С целью управления дозированием на основе данных онлайн-контроля практическими задачами являются:

- обеспечение представительности проб и стабильности условий измерений проточными анализаторами;
- обеспечение максимальной близости результатов, полученных проточными анализаторами и лабораторным методом;
- выполнение технических требований к измерительно-вычислительным комплексам, создаваемым с целью автоматизации дозирования реагентов.

Технические требования к измерительно-вычислительным комплексам, обеспечивающие высокую надежность измерений:

- высокая селективность, чувствительность к малым концентрациям измеряемой величины и высокая точность проточных анализаторов;
- автоматическая компенсация измерений по влияющим факторам;
- возможность анализа нескольких показателей в одной пробе за одно измерение;
- предустановленные заводские калибровки и возможность локальной калибровки анализаторов на месте измерений;
- автоматическая очистка и самодиагностика;
- продолжительный межсервисный интервал.

<sup>53</sup> НДТ 10 № 2'2020. Методы повышения эффективности удаления органических загрязнений из поверхностных вод.



Доза от прибора контроля качества – 5,87 мг/л



Рис. 36. Типовая система контроля качества воды

Требования к организации онлайн-контроля:

- представительность пробы;
- стабильность условий подачи проб к проточным ячейкам;
- возможность локальной калибровки для сближения результатов лабораторных и онлайн-измерений;
- периодическая проверка проточных анализаторов на соответствие результатов измерений значению доверительного интервала;
- наличие программного обеспечения для валидации данных.

### База данных

Архитектура взаимосвязи сбора данных формируется как основа создания реляционной базы данных с целью последующего применения этой базы данных в системе интеллектуального управления процессами водоподготовки. Реляционная база данных представляет собой совокупность отношений, содержащих всю информацию, которая должна храниться в базе данных;



т. е. база данных представляет набор таблиц, необходимых для хранения всех данных. Таблицы реляционной базы данных логически связаны между собой (табл. 4–6).

Четкое описание функциональных зависимостей параметров технологических процессов водоподготовки лежит в основе создания реляционной базы данных. Следует учесть тот факт, что база данных создается для производственного процесса водоподготовки с уже определенными последовательностью технологических процессов, составом очистных сооружений и оборудования, методами контроля, выбора и способами получения и архивации параметров водоподготовки.

Таблица 4. Основные значимые технологические параметры качества воды водоисточника, влияющие на процесс осветления воды на станциях водоподготовки

Наименование параметра	Единицы измерения
Температура	градус
Мутность	мг/дм <sup>3</sup>
Цветность	градус
Перманганатная окисляемость	мг/дм <sup>3</sup>
pH	единицы pH
Щелочность	ммоль/дм <sup>3</sup>
Общий органический углерод	мг/дм <sup>3</sup>
Растворенный органический углерод	мг/дм <sup>3</sup>
Метеоданные (скорость и направление ветра, количество осадков, уровень воды в водозаборе)	м/с; мм; м

Таблица 5. Функциональные зависимости параметров качества воды водоисточника и параметров технологического процесса осветления

Параметры качества воды водоисточника (неуправляемые)	Параметры технологического процесса	Источники выбора параметров технологического процесса
Температура	Доза коагулянта	Массив данных, результаты пробных лабораторных процессов, режимные карты
Мутность		
Цветность	Доза флокулянта	Массив данных, результаты пробных лабораторных процессов, режимные карты
Перманганатная окисляемость		
pH	Гидравлическая нагрузка на сооружения	Фактическое водопотребление на текущие сутки, часовая нагрузка на технологическую линию
Щелочность	Техническое состояние	Массив данных производственного процесса (технологические исследования)
Общий органический углерод		
Растворенный органический углерод	Высота осадка в отстойнике	Массив данных производственного процесса (технологические исследования)

При создании реляционной базы данных была выбрана теория ключей, ключам присвоено название технологических процессов. Таким образом, при создании автоматизированной системы интеллектуального управления процессом водоподготовки решается вопрос оценки и выбора параметров каждого имеющегося в системе технологического процесса с определением входных и выходных значений его параметров.

Таблица 6. Эффективность работы сооружений в зависимости от выбранных параметров

Параметры технологического процесса (управляемые)	Показатели эффективности технологического процесса (результаты лабораторного и приборного онлайн-контроля)	
	Двухступенчатая схема	
	1-я ступень – отстаивание (седиментация)	2-я ступень – фильтрация
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Доза коагулянта</li> <li>– Доза флокулянта</li> <li>– Гидравлическая нагрузка на сооружения</li> <li>– Техническое состояние сооружений</li> <li>– Высота осадка (для двухступенчатой схемы)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Мутность</li> <li>– Алюминий в отфильтрованной пробе</li> <li>– Качество хлопьеобразования</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Мутность</li> <li>– Остаточный алюминий</li> <li>– Фильтроцикл</li> <li>– Расход воды на собственные нужды</li> </ul>

При обеспечении качественной водой населения в каждом городе и населенном пункте страны сегодня на первый план выходит задача повсеместной модернизации водоканалов, превращения их в компании, использующие в своей деятельности наукоемкие технологии, эффективные способы энергосбережения и современные методы управления.

## ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассматривая воду как продукт, можно представить условный жизненный цикл, начинающийся от забора воды (из поверхностного или подземного источника) и заканчивающийся возвращением воды в природу (рис. 37).

В настоящее время водоподготовка определяется как любой стандартный процесс, изменяющий химические, физические или бактериологические характеристики воды для того, чтобы сделать ее безопасной для потребления и привлекательной для потребителя. Кроме того, обработка воды проводится с целью защиты компонентов системы водоснабжения от коррозии.

В качестве источников водоснабжения используют поверхностные и подземные воды, а в безводных и засушливых районах — атмосферные осадки в виде дождя и снега. Следует обратить внимание на то, что подготовка подземных вод существенно отличается от подготовки поверхностных вод.

Современный подход в области оптимизации производственных процессов водоподготовки предусматривает внедрение инновационных решений и технологий с целью повышения эффективности очистки, минимизации рисков образования вредных веществ (по которым установлены нормативы санитарно-токсикологические и органолептические), снижения непродовственных затрат.



Рис. 37. Графическое представление жизненного цикла воды

Задача обеспечения населения питьевой водой нормативного качества и в достаточном количестве является основополагающей для любого государства. В современной России эта задача законодательно закреплена Федеральным законом «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (№ 52-ФЗ 1999 г.). В основу гигиенических требований к качеству питьевой воды положен принцип, ставящий в центр внимания то качество воды, от которого зависят здоровье и условия жизни человека. На основе этого принципа в середине XX в. была сформулирована триада гигиенических требований к питьевой воде: питьевая вода должна быть безопасной в эпидемиологическом и радиационном отношении, безвредной по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства. Эта триада ныне признана во всем мире, и на ее основе создаются национальные нормативные документы в области контроля качества питьевой воды. В нашей стране для питьевой воды централизованного водоснабжения действует СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Приоритетным является нормативное качество питьевой воды. Однако понятие «водоснабжение» имеет более широкий смысл чем обеспечение потребителя

водой питьевого качества, так как это основа многих производств, в том числе использование воды для технических нужд различных предприятий, нужд мелиорации, создания благоприятной среды обитания в городах и иных населенных пунктах и т. д. Тем не менее какова бы ни была область применения воды, есть общие методы, позволяющие достигать ту или иную степень очистки воды.

Вода без примесей в природе не встречается. Природная вода содержит разнообразные вещества, которые могут различаться по виду и концентрации основных компонентов (табл. 7).

Таблица 7. Основные компоненты природных вод

Состояние	Истинный раствор				Коллоидный раствор	Суспензия
	Молекулярный и ионный дисперсионный					
Характеристика	Молекулярный и ионный дисперсионный				Коллоидный дисперсионный	Грубодисперсная
Наиболее часто встречающийся диаметр частицы	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-8</sup> м				10 <sup>-9</sup> – 10 <sup>-7</sup> м	> 10 <sup>-7</sup> м
	Электролиты		Неэлектролиты		–	–
	Катионы	Анионы	Газы	Твердые вещества	–	–
Основные компоненты (обычно с концентрацией > 10 мг/л)	Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup> Mg <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	O <sub>2</sub> N <sub>2</sub> CO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	–	Суглинок, мелкозернистый песок, гидроокись Fe и Mn
Дополнительные примеси (обычно в пределах 0,1–10,0 мг/л)	Fe <sup>2+</sup> Mn <sup>2+</sup> NO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	F <sup>-</sup> J <sup>-</sup> Br <sup>-</sup> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> PO <sub>2</sub> <sup>3-</sup>	H <sub>2</sub> S NH <sub>3</sub> CH <sub>4</sub>		Гидроокись железа и марганца, гуминовые вещества	
Вещества, содержащиеся в малых количествах (обычно < 0,1 мг/л)	Cu <sup>2+</sup> Zn <sup>2+</sup> Pb <sup>2+</sup>		Rn			

Некоторые компоненты могут попадать в воду вследствие деятельности человека, что приводит к неблагоприятному изменению ее свойств. В этом случае принято говорить об антропогенном загрязнении воды. Бактерии, вирусы и простейшие микроорганизмы также могут попадать в воду, но их наличие обнаруживается только при возникновении неприятного запаха, вкуса или инфекций.

В настоящее время существует множество стандартных способов водоподготовки.

**Выбор технологии водоподготовки зависит от природы и качества воды, которую необходимо обработать, и желательного качества подаваемой потребителю воды.**

Для создания технологии водоподготовки и выбора конструктивных решений водоочистных сооружений необходимо проведение предварительного изучения состава и свойств воды источника, намечаемого к использованию, и их сопоставления с требованиями потребителя. Таким образом, выбор метода обработки воды основывают на сопоставлении качества воды источника водоснабжения (данные технических и технологических анализов) с требованиями нормативных документов или регламентом технологии потребления.

Как правило, для небольших систем водоснабжения выбор методов водоподготовки ограничен малым числом стандартных технологических операций; отчасти это обусловлено тем, что источником водоснабжения в локальных системах обычно являются подземные воды. Кроме того, небольшие размеры локальных систем делают многие сложные технологии экономически неоправданными (например, слишком затратными при установке, дорогими в эксплуатации, слишком сложными для управления ограниченным числом операторов).

Обобщенная информация по базовым процессам водоподготовки представлена в таблице 8.

Таблица 8. Основные технологии водоподготовки

Процесс	Назначение
Фильтрация через сетчатый фильтр	Удаление крупных фрагментов мусора (листья, палки, рыба), загрязняющих оборудование станции или нарушающих его работу
Предварительная химическая обработка	Кондиционирование воды – удаление водорослей и других водных организмов
Предварительное осаждение	Удаление гравия, песка, ила и других крупнозернистых материалов
Микрофильтрация	Удаление водорослей, водных растений и мелкого мусора
Подача химических реагентов и быстрое смешивание	Добавление химикатов (например, коагулянтов, регуляторов pH) в воду
Осаждение	Удаление частиц, способных к оседанию
Умягчение	Удаление из воды химических веществ, определяющих жесткость
Фильтрация	Удаление твердых частиц, вызывающих мутность воды и биологическое загрязнение
Обеззараживание	Уничтожение болезнетворных организмов
Адсорбция на гранулированном или порошкообразном активированном угле	Удаление радона и большинства органических соединений, таких как пестициды, растворители и тригалометаны
Аэрация	Удаление летучих органических соединений (ЛОС), радона, H <sub>2</sub> S и других растворенных газов; окисление железа и марганца

Таблица 8 (окончание)

Процесс	Назначение
Контроль коррозионной активности	Профилактика образования отложений и коррозии компонентов системы
Обратный осмос, электродиализ	Удаление почти всех неорганических загрязнителей
Наночелчтрация	Удаление неорганических загрязнений, ионов металлов с меньшей селективностью и большей производительностью по отношению к обратному осмосу
Ионный обмен	Удаление некоторых неорганических загрязнителей, в том числе определяющих жесткость воды
Фильтрование с окислением	Удаление некоторых неорганических загрязнителей (например, железа, марганца, радия)
Ультрафильтрация	Альтернатива (или дополнение) процессу осветления, удаление макромолекул, части органических загрязнителей и бактериального компонента
Снижение коррозионной активности воды	Введение в обработанную воду реагентов, изменяющих свойство воды в отношении материалов трубопроводов с целью сохранения качества воды и снижения риска аварийных ситуаций

Последующее описание методов дает представление о наиболее распространенных технологиях водоподготовки.

### Этапы водоподготовки

Общепринятая модель водоподготовки для поверхностных водных источников представлена на рисунке 38, на котором четко видно, что водоподготовка представляет собой многоступенчатый процесс, т. е. ряд стандартных технологических процессов, объединенных в единую систему водоподготовки.

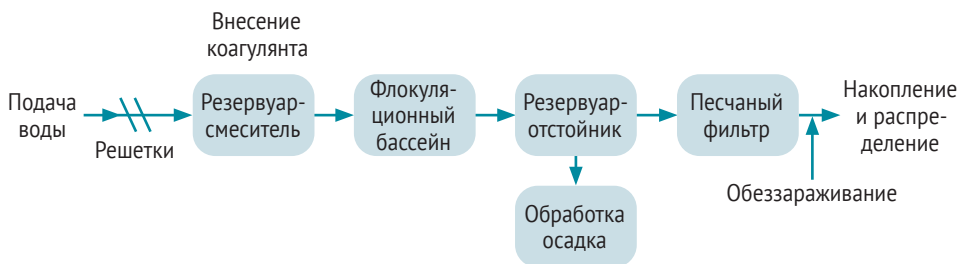


Рис. 38. Традиционная схема водоподготовки для поверхностных водных источников (жизненный цикл)

Отметим, что отдельная система может включать в себя все обсуждаемые далее стандартные этапы или любые их комбинации. Для решения одной или нескольких перечисленных задач может быть использован один или несколько

стандартных технологических этапов. Кроме того, следует отметить, что представленная модель (см. рис. 38) не всегда применима в малых водопроводных системах. В некоторых малых системах водоподготовка представляет собой лишь откачивание воды с помощью насосов из подземного источника, накопление и последующее распределение. Иногда при необходимости к этим действиям добавляется этап обеззараживания.

### *Предварительная обработка*

Предварительная обработка воды (первичная обработка) представляет собой физический, химический или механический процесс, предшествующий основным этапам водоподготовки. Процесс может включать в себя улавливание мусора сетчатыми фильтрами, первичное осаждение и добавление химикатов. Операции первичной обработки воды, как правило, предусматривают окисление или другую обработку, направленную на устранение привкуса и запахов, железа и марганца, предшественников тригалометанов и газовых включений (например, сероводорода). Стандартные процессы могут включать в себя окисление хлором, перманганатом калия или озоном, добавление активированного угля, аэрацию и первичное осаждение. Первичная обработка поверхностных вод проводится для удаления определенных компонентов и материалов, которые мешают обработке или представляют собой излишнюю нагрузку для традиционных систем водоподготовки.

Принцип аэрации состоит в распылении воды и обогащении ее кислородом из воздуха или техническим кислородом. Движение воды и воздуха может осуществляться прямотоком, противотоком или в перекрестном направлении.

Аэрация проводится при подготовке воды, содержащей газы (сероводород и т. п.), придающие воде неприятные вкус и запах. Простое выдерживание воды в резервуаре с вентиляцией приводит (иногда) к удалению большого количества газа, однако в большинстве случаев необходима принудительная аэрация. Аэрация наиболее эффективна (удаление около 85 % сульфидов), если рН воды не превышает 6,5. Кроме этого, при аэрации происходит частичное окисление железа и марганца, окисление гуминовых веществ, потенциально образующих тригалометаны в процессе хлорирования, удаление других источников вкуса и запаха и обогащение кислородом воды, испытывающей дефицит кислорода.

Прохождение через сетчатые фильтры — первый важный этап процесса водоподготовки. В ходе этого этапа сравнительно крупные взвешенные фрагменты мусора удаляются из воды перед ее попаданием на станцию водоподготовки. Речная вода, например, содержит взвешенные и плавающие фрагменты мусора различных размеров, от мелких камней до бревен. Удаление этих твердых фрагментов важно не только потому, что присутствие этих материалов в водопроводной воде недопустимо, но и потому, что мусор может стать причиной поломки оборудования, расположенного ниже по течению, например, может вызвать засорение и поломку насосов. Кроме того, наличие мусора заставляет добавлять в воду больше химикатов, препятствует потоку жидкости в открытых каналах и трубах и мешает процессу обработки воды.

Самым важным критерием, используемым при выборе конкретной системы сетчатых фильтров для водоподготовки, являются размеры ячеек сетки и скорость потока. Среди других важных критериев — стоимость операций и оборудования, гидравлическая система станции водоподготовки, требования к обработке мусора, квалификация операторов и доступность системы. На крупных станциях водоподготовки можно использовать различные фильтрующие приспособления, включая сороудерживающие сита, вращающиеся сетки, барабанные решетки, решетки из стальных прутьев и фильтры с инертными фильтрующими материалами.

### Коагуляция и отстаивание

Одним из широко применяемых на практике приемов обработки воды является коагулирование взвешенных и коллоидных частиц. При помощи специальных добавок (коагулянтов и флокулянтов) данные вещества агрегируются в крупные хлопья, которые впоследствии оседают.

Коагуляцией примесей воды называется процесс укрупнения мельчайших коллоидных и диспергированных частиц, происходящий вследствие их взаимного слипания под действием силы молекулярного притяжения. Коагуляция завершается образованием видимых невооруженным глазом агрегатов — хлопьев — и отделением их от жидкой среды.

После коагуляции проводят отстаивание. Для осаждения хлопьев используют круглые или прямоугольные отстойники, при этом осадок собирается и отводится в специальные приямки или удаляется механическими скребками. Применяют также осветлители со взвешенным осадком, в которых часть «старого» хлопьевидного осадка возвращается в камеру хлопьеобразования.

В современных технологиях используют тонкослойные отстойники с отдельной пристроенной многоступенчатой системой коагуляции, флокуляции и хлопьеобразования (рис. 39).

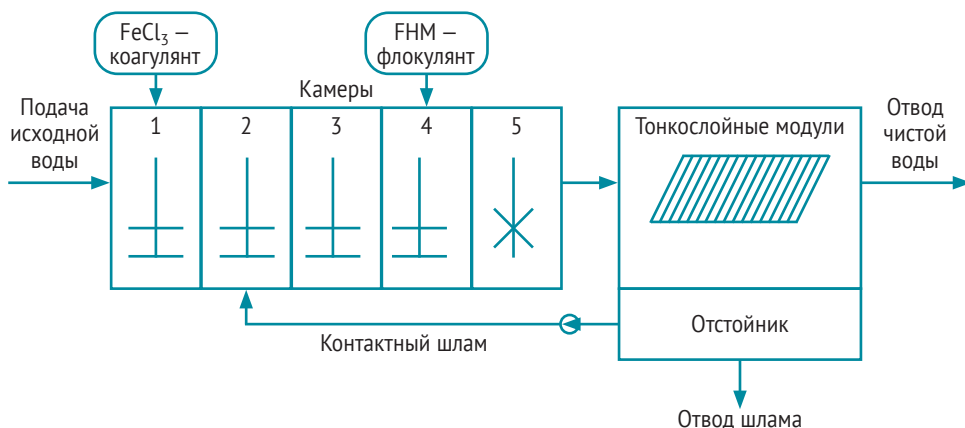


Рис. 39. Многоступенчатая установка для коагуляции с тонкослойным отстойником:

- 1 — дозирование коагулянта; 2 — подача контактного шлама; 3 — хлопьеобразование;  
4 — подача полимеров; 5 — флокуляция



### Фильтрация

Согласно общепринятой схеме водоподготовки, фильтрация обычно следует за коагуляцией, флокуляцией, осаждением или флотацией. В настоящее время в небольших системах водоснабжения фильтрация не всегда является обязательным этапом.

Фильтрация воды — физический процесс удаления взвешенных и коллоидных частиц из воды путем пропускания воды через зернистый материал. Процесс фильтрации включает в себя этапы процеживания, оседания и поглощения. Когда хлопья попадают на фильтр, пространство между зернами наполнителя фильтра заполняется, уменьшая отверстия, что позволяет удалять частицы меньшего размера. Частично вещество удаётся извлечь из воды просто потому, что оно оседает на зернах наполнителя фильтра. Одним из самых важных этапов является поглощение хлопьев поверхностями отдельных зерен наполнителя фильтра. Это помогает собрать хлопья и уменьшает пространство между зернами наполнителя.

Фильтры выполняют следующие функции:

- задерживают вещества, вызывающие мутность;
- улучшают цвет, вкус, запах;
- задерживают нерастворенные минеральные и органические вещества, а также могут снижать количество микроорганизмов.

Фильтры классифицируют по следующим признакам:

- скорости фильтрации (медленные и быстрые);
- конструкции (открытые и закрытые);
- количеству слоев загрузки (однослойные и многослойные);
- направлению движения жидкости (с нисходящим или восходящим движением воды);
- напору (безнапорные и напорные);
- материалу загрузки.

*Медленные песчаные фильтры* являются открытыми безнапорными фильтрами, на выходе из которых вода, благодаря длительному пребыванию в них, становится почти питьевого качества. В настоящее время такие фильтры редко применяются из-за больших конструктивных размеров и затрат, обусловленных длительностью обработки воды.

Поддерживающие слои медленных песчаных фильтров высотой примерно 50–60 см состоят из четырех групп зерен:

- верхний слой: песок — 0,71–1,40 мм;
- средний слой: гравий — 3,15–5,60 мм;
- нижний слой: гравий — 5,6–8,0 или 8–16 мм;
- дренажный слой: гравий — 4–20 мм.

Медленные песчаные фильтры не имеют обратной промывки. Верхний слой загрузки взрыхляется и очищается (зачистка фильтров).

Скорые песчаные фильтры подразделяются в основном на открытые и закрытые. Открытые фильтры, как правило, представляют собой емкость, изготовленную из бетона, закрытые — стальные напорные резервуары.

Открытые скорые песчаные фильтры (рис. 40) имеют конструкцию, схожую с конструкцией медленных фильтров. Дополнительно в них устанавливают устройства для обратной промывки и отвода промывной воды. Отвод фильтрата и равномерное распределение воздуха и промывной воды производится через дренажное устройство фильтра (рис. 41).

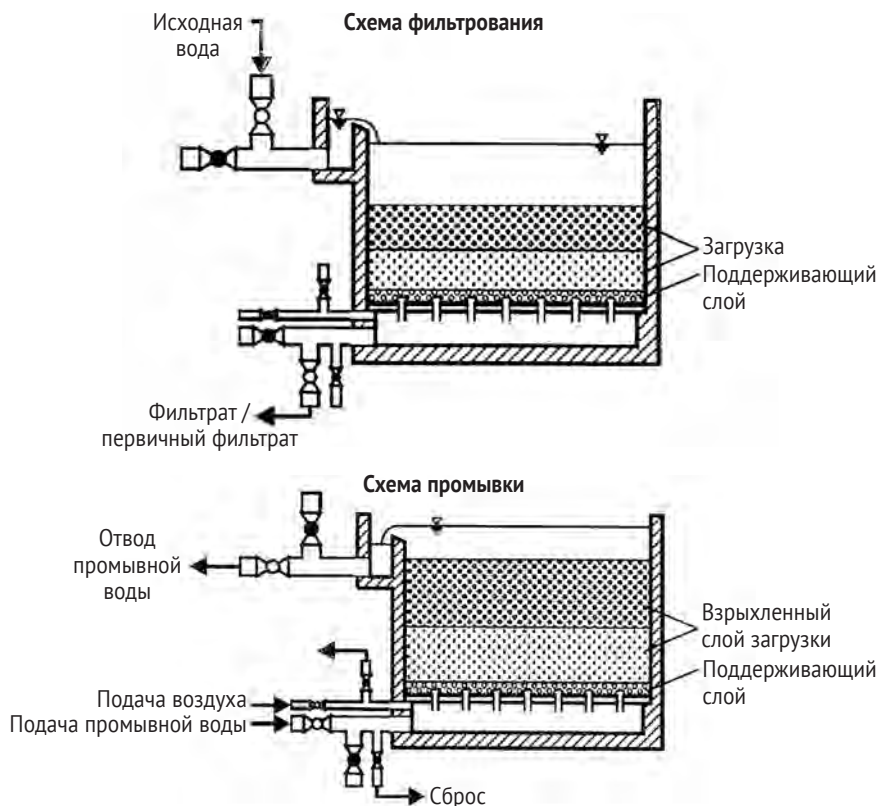


Рис. 40. Схема конструкции открытого скорого песчаного фильтра

*Фильтрация и обратная промывка закрытых скорых песчаных фильтров.* На рисунке 42 приведены схемы фильтрования и обратной промывки в закрытом скором песчаном фильтре.

Верхний слой загрузки многослойных фильтров состоит, как правило, из крупного легкого антрацита, а нижний — из мелкого тяжелого кварцевого песка. Благодаря разным размерам зерен задерживаемые примеси глубже проникают в фильтрующий слой (действие пространственного фильтра). По этой причине многослойные фильтры, в отличие от однослойных, имеют более длительный фильтрационный цикл.

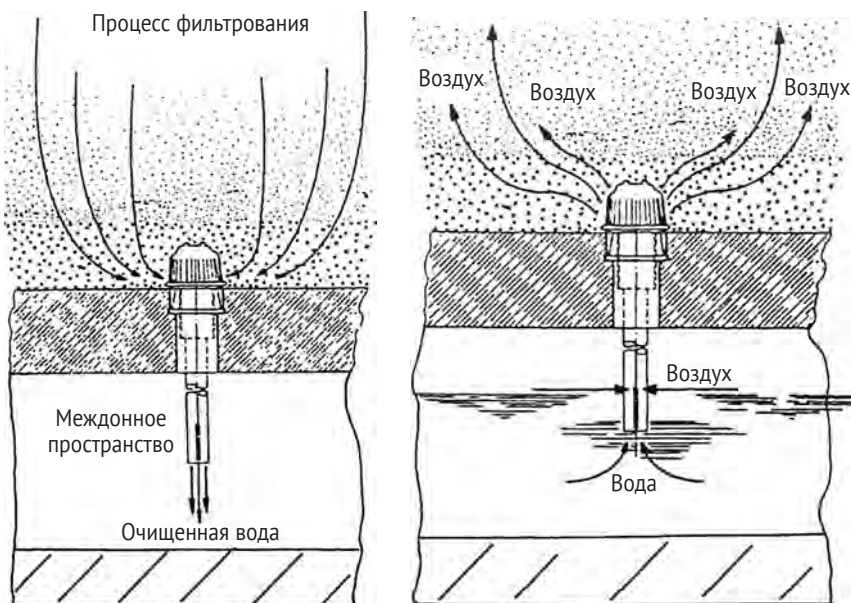


Рис. 41. Процесс фильтрации и обратной промывки в открытом скором песчаном фильтре с колпачковым дренажем

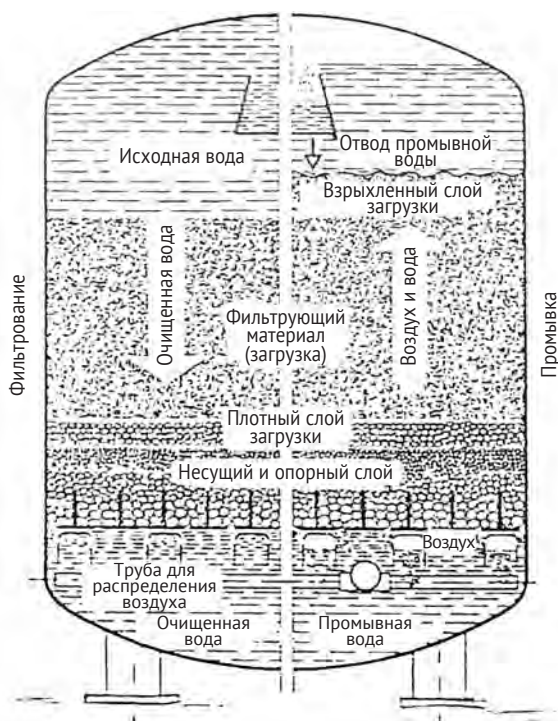


Рис. 42. Процесс фильтрации и обратной промывки в закрытом скором песчаном (напорном) фильтре

При скорой фильтрации очистка загрузки происходит за счет обратной ее промывки. По мере загрязнения фильтрующего слоя возрастает сопротивление фильтра. При достижении максимально допустимого сопротивления выполняется обратная промывка фильтра.

Как правило, сначала однослойные фильтры промываются воздухом (примерно 1–3 мин,  $v = 60$  м/ч), затем происходит комбинированная промывка воздухом и водой (примерно 5–10 мин) и, наконец, только водой (примерно 3–5 мин,  $v = 50$  м/ч). На этапе комбинированной промывки скорость воды составляет примерно 10 м/ч.

В большинстве случаев для многослойных фильтров водовоздушная промывка не применяется, поскольку может произойти перемешивание фильтрующего материала и его вынос. Поэтому многослойные фильтры следует промывать отдельно воздухом (примерно 1–3 мин) и затем водой (примерно 3–5 мин). При промывке водой ( $v = 60$ – $80$  м/ч) должно достигаться взвешивание фильтрующего слоя.

После завершения процесса обратной промывки загрязненная промывная вода не должна сбрасываться в поверхностные водоемы, она может отводиться в отстойник, в котором отмытые частицы выпадают в осадок. После отстаивания производят отвод чистой воды в водоприемник. Осадок следует удалять регулярно. Чаще всего его направляют для последующей обработки на ближайшую очистную станцию или обезвоживают.

### *Умягчение, декарбонизация*

Снижение концентрации солей жесткости кальция и магния (общая жесткость воды) называется умягчением воды. Для умягчения воды применяют методы ионного обмена или мембранного фильтрования, включая электродиализ.

При ионном обмене ионы солей жесткости кальция и магния замещаются другими ионами. В водоснабжении в основном используют ионообменные материалы, замещающие ионы натрия ионами кальция и магния. Ионообменник регенерируется раствором поваренной соли. В централизованном водоснабжении ионообменники редко используются только для умягчения воды. Благодаря небольшим затратам ионный обмен применяют также в промышленности, мелком производстве и домашнем хозяйстве.

Мембранное умягчение основано на применении нано- и обратноосмотических мембран. При нанофильтрации имеет место обычный барьерный процесс фильтрования через очень тонкие поры. Обратный осмос — процесс, основанный на диффузном проникновении через мембрану молекул под большим внешним давлением.

Принцип электродиализа основывается на селективной проницаемости мембран для катионов и анионов. При наложении разности потенциалов к солевому раствору положительно заряженные частицы проходят через селективную катионообменную мембрану, а отрицательно заряженные частицы — через селективную анионообменную мембрану и концентрируются за ними.

Умягчение воды известкованием применяют при ее высокой карбонатной и низкой некарбонатной жесткости (декарбонизация), когда требуется

одновременное снижение жесткости и щелочности воды. Этот метод получил распространение в сочетании с последующим натрий-катионированием для получения глубоко умягченной воды с небольшой щелочностью.

Различают медленную и быструю декарбонизацию. Медленная декарбонизация включает в себя различные процессы подготовки (химическое осаждение, коагуляция и отделение хлопьев), которые происходят в нескольких последовательно расположенных перед отстойниками реакторах (рис. 43).

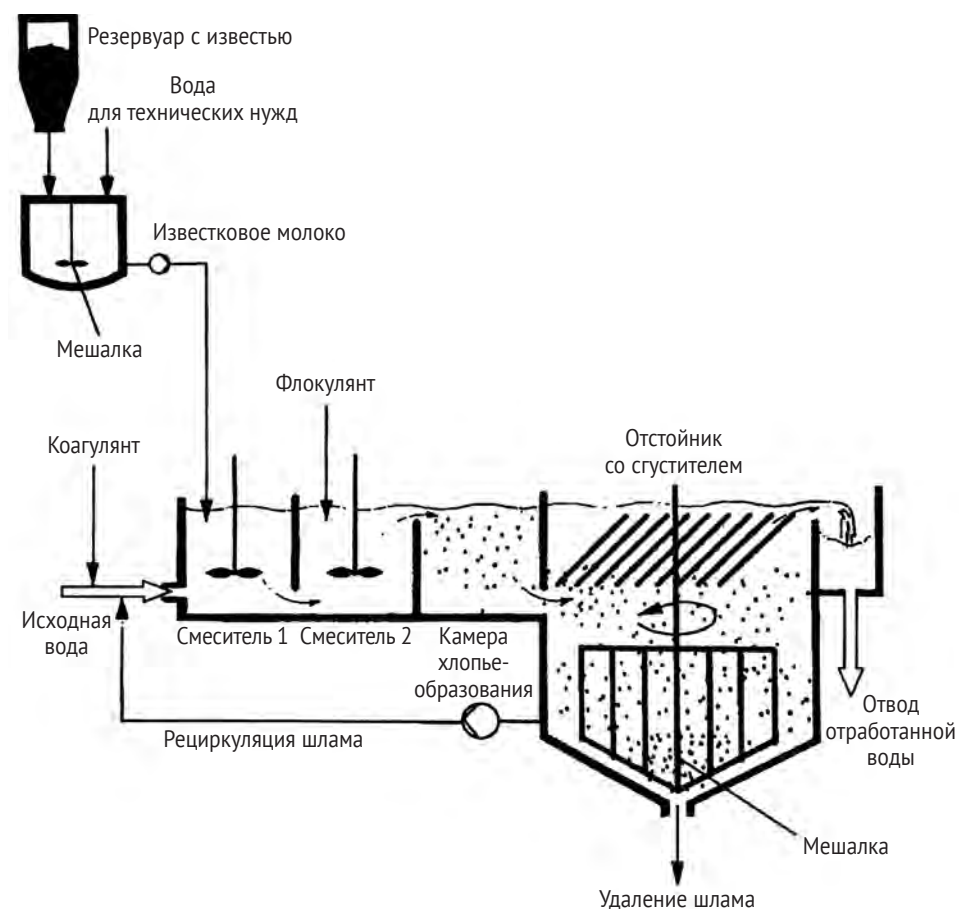


Рис. 43. Конструкция установки для медленной декарбонизации

Осаждаемая известь образует хлопья, в отстойнике сгущающиеся в суспензию с концентрацией сухой массы приблизительно 35%. Поэтому шлам<sup>54</sup> в установке для декарбонизации следует дренировать перед отправкой в место хранения отходов.

<sup>54</sup> Шлам — осадок в виде мелких частиц, образующийся при отстаивании или фильтрации жидкости.

Быстрая декарбонизация производится в реакторе конической формы высотой более 10 м в восходящем потоке воды (рис. 44).

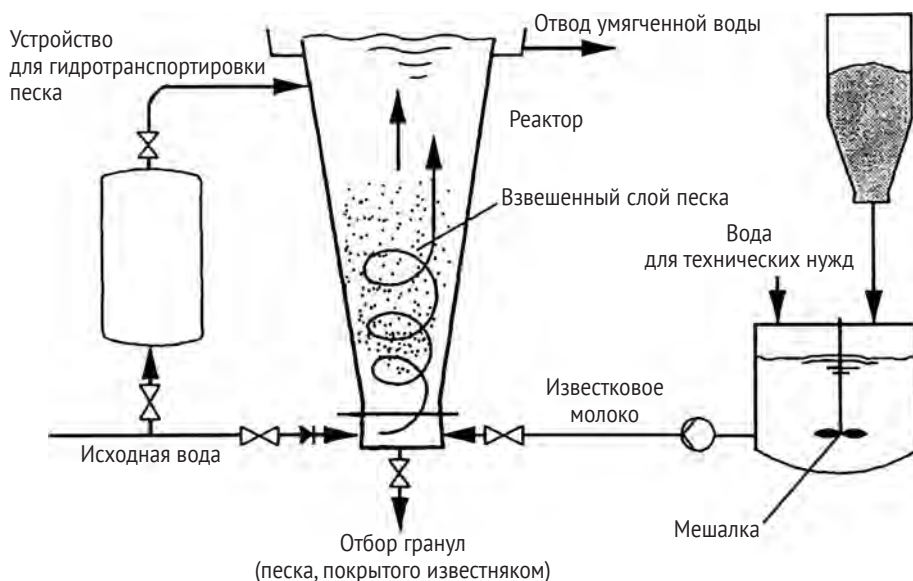


Рис. 44. Конструкция установки для быстрой декарбонизации

В нижней части реактора находится песок, который переводится во взвешенное состояние потоком воды и на котором откладывается известь. Поскольку зерна песка при этом увеличиваются в размере, время от времени их следует перемешивать со свежим песком. Содержание зерен песка, покрытых известняком (гранул), составляет приблизительно 95%. Они не требуют последующей обработки, и сразу после отвода из быстрого реактора их можно вывозить в место хранения отходов или, к примеру, использовать в качестве строительного материала.

#### *Снижение коррозионной активности воды*

Технология изменения качества воды по показателям, влияющим на ее коррозионную активность в отношении материалов сооружений, с которыми вода контактирует, получила название «снижение коррозионной активности воды».

На некоторых водопроводных сооружениях успешно внедряется технология применения активной загрузки доломитизированного кальцита модифицированного, который добавляется к песчаной загрузке фильтровальных сооружений.

Доломитизированный кальцит модифицированный применяется для коррекции кислотно-основных свойств воды. Принцип работы корректирующих рН загрузок основан на сдвиге равновесия реакций гидролиза ионов металлов в сторону образования нерастворимых гидратированных оксидов металлов ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), а также на понижении Red/Ox потенциала окислительно-восстановительных реакций за счет нейтрализации ионов водорода, образующихся в результате протекания реакций гидролиза и окисления.

Загрузка производится из доломитов, цеолитов и пиролюзитов с помощью метода термохимической модификации карбонатных пород, сдвигающей равновесия реакций гидролиза ионов металлов в сторону образования нерастворимых гидратированных оксидов металлов. Карбонатные породы имеют свойство нейтрализации ионов водорода, которые образуются в результате реакции окисления и гидролиза, тем самым понижая окислительно-восстановительный потенциал воды, нормализуя значение pH, а также снижая коррозионную активность воды. Данную фильтрующую загрузку можно использовать в качестве материала обезжелезивания при низком значении pH без дозирования дополнительных реагентов. Загрузка имеет следующий химический и физический состав.

Химический состав:

—  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$  — 95 %;

—  $\text{SiO}_2$  — 0,04 %;

—  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 0,6 %;

—  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 0,1 %.

Физический состав:

— истинная плотность — 2670 кг/м<sup>3</sup>;

— насыпная плотность — 1450 кг/м<sup>3</sup>;

— измельчаемость — не более 0,6 %;

— истираемость — не более 0,2 %.

Гранулометрический состав фракции 2–3 мм:

— содержание годной фракции — 99,2 %;

— эквивалентный диаметр — 2,5 мм;

— коэффициент неоднородности — 1,3.

Главной особенностью указанного материала является высокая механическая прочность и малая истираемость. Данная особенность обусловлена тем, что материал получают из пород глубокого залегания. Также химический состав исходной воды не влияет на эксплуатационные свойства доломитизированного кальцита модифицированного. Наличие высокой механической прочности позволяет применять данную загрузку в одном фильтровальном сооружении с абразивным кварцевым песком и минимизировать эффект истирания активной загрузки при промывке контактных осветлителей, что, в свою очередь, считается положительным фактором при оценке эксплуатационных затрат.

Производителями корректирующей pH загрузки рекомендовано осуществлять регенерацию фильтрующего материала путем обратной промывки фильтров питьевой водой с интенсивностью 15 л/с на один квадратный метр в течение 6–8 мин. Рекомендуемая скорость фильтрации — не более 5–10 м/ч; ограничения по скорости фильтрации обусловлены необходимым временем контакта загрузки с водой для достижения эффекта обезжелезивания и повышения pH воды до оптимальных значений.

Условия хранения: помещение с температурой воздуха +5...+50°С и относительной влажностью воздуха не более 70 %. Срок хранения в закрытой таре не ограничен. Выбранный материал не содержит химически активных и вредных для здоровья компонентов, требующих специальных мер безопасности.

### Обеззараживание

Обеззараживание воды входит в комплекс мероприятий, проводимых для предупреждения и ликвидации инфекционных болезней, передающихся водным путем (холера, брюшной тиф, туляремия, инфекционный гепатит, энтеровирусные инфекции)<sup>55</sup>.

Обеззараживание воды, т. е. инаktivация микроорганизмов — возбудителей инфекционных и паразитарных болезней в воде с целью прерывания путей передачи эпидемического процесса, всегда было острой необходимостью. Стимулом для внедрения технологий обеззараживания питьевой воды послужили бушевавшие в Европе эпидемии холеры и брюшного тифа в конце XIX в.: обеззараживающим реагентом служила хлорная известь. Опыт был проведен в Гамбурге в 1892 г. во время эпидемии холеры. Теоретической основой послужили проведенные в этот же период экспериментальные работы М. Траубе, Р. Коха и Х. Ниссена. Впервые в России хлорировали воду на Кронштадтском водопроводе в 1910 г. А с 1912 г. началось хлорирование на Главной водопроводной станции в Петербурге. Однако трудности с получением, использованием, дозированием хлорной извести послужили поводом для поиска новых форм хлора (жидкий хлор, гипохлорит натрия, диоксид хлора, неорганические хлорамины и др.), а также других веществ, которые могут стать обеззараживающими реагентами. Так в промышленных масштабах в 1910 г. получило распространение обеззараживание УФ-излучением, а в 1907 г. — озонирование. Позднее появились и другие методы обеззараживания питьевой воды, позволяющие достичь поставленных целей.

Наиболее опасные для человека водные патогенные организмы:<sup>56</sup>

- вирусы (Adenovirusos, Enteroviruses, энтеровирусы гепатита А, В, Е, Rotavirus, мелкие круглые вирусы, поливирусы, Influenza, Echoviruses, Coxiackie);
- бактерии (патогены *Escherichia coli*, *Salmonella typhi*, *Vibrio cholerae*, *Yersinia enterocolitica*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Aeromonas* spp., *Legionella pneumophila*);
- простейшие агенты (*Giardia lamblia*, *Giardia muris*, *Cryptosporidium parvum*, *Entamoeba histolytica*, *Dracunculus medinensis* spp.).

Эпидемиологическое значение обеззараживания определяется выживаемостью микроорганизмов в воде (табл. 9). Максимальные сроки выживаемости возбудителей инфекции зависят от вида микроорганизма и температуры воды. Бактерии выживают от 30 до 115 сут, вирусы — от 37 до 200 сут, риккетсии — от 100 до 160 сут, споры сибиреязвенной палочки — от 10 до 20 лет, ботулинический токсин сохраняется в воде до 45 сут<sup>57</sup>.

<sup>55</sup> Афанасьева Т. В. и др. Питьевая вода как среда обитания патогенных энтеровирусов и актуальные проблемы ее вирусного загрязнения. — М., 2006. — С. 945–946; Журба М. Г. и др. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учеб. пособие : в 3 ч. — Ч. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. — М. : АСВ, 2003.

<sup>56</sup> Журба М. Г. и др. Водоснабжение... Ч. 2.

<sup>57</sup> Соколова Н. Ф. Средства и способы обеззараживания воды (аналитический обзор) // Медицинский алфавит. — 2013. — Т. 1, № 5. — С. 44–54.



Таблица 9. Выживаемость возбудителей инфекции в воде

Инфекция	Выживаемость, сут
Холера	92
Чума	115
Лептоспироз	30
Кампилобактериоз	30
Иерсиниоз	30
Туляремия	100
Инфекционный гепатит	130
Энтеровирусы	4°С – 200; 20°С – 37
Полиомиелит	> 100
Сибирская язва	10–20 лет

В неочищенных сточных водах содержится от  $10^3$  до  $7 \cdot 10^6$  в  $1 \text{ см}^3$  болезнетворных бактерий (коли-титр (КТ) —  $10^{-2}$ – $10^{-7}$ , а коли-индекс (КИ) —  $2 \cdot 10^8$ ; титр энтерококка ТЭ =  $10^{-1}$ – $10^{-4}$  ед./см<sup>3</sup>). После биологической очистки на вторичных отстойниках 1 мл воды все еще содержит до  $2 \cdot 10^6$  бактерий, 100 бактериофагов.

Нормой для питьевой воды считается «отсутствие» показателя (табл. 10), т. е. его определение на уровне ниже минимального достоверного значения.

Таблица 10. Основные нормируемые показатели

Показатель	Нормативы
Общее микробное число (ОМЧ), $37,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$	Не более 50
Обобщенные колиформные бактерии	Отсутствие
<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )	Отсутствие
Энтерококки	Отсутствие
Колифаги	Отсутствие
Цисты и ооцисты патогенных простейших, яйца и личинки гельминтов	Отсутствие
Споры сульфитредуцирующих клостридий	Отсутствие
Возбудители кишечных инфекций бактериальной природы	Отсутствие
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Отсутствие
Возбудители кишечных инфекций вирусной природы	Отсутствие
<i>Legionella pneumophila</i>	Не более 100

Существенным является то обстоятельство, что при водоподготовке воду обеззараживают, но не стерилизуют, что, в свою очередь, обуславливает наличие в питьевой воде непатогенных микроорганизмов. Поэтому в настоящее время принято выражать эффективность обеззараживания как 99%; 99,9% и т. д. Это соответствует снижению количества микроорганизмов в обрабатываемой воде на два, три и более порядков. Удовлетворительной считается степень обеззараживания в пределах 99,990–99,999%.

Для обеспечения высокой степени обеззараживания воды необходимо подбирать режим обеззараживания, эффективный в исходных условиях. Данные условия учитывают источник водоснабжения, качество и состав исходной воды, включая физико-химические характеристики примесей в воде, сезонность, состав технологических сооружений водоподготовки.

Выделяют основные группы источников водоснабжения:

- поверхностные источники;
- подземные источники.

Сравнительный анализ показателей загрязнения воды поверхностных и подземных источников централизованного водоснабжения за 2011–2020 гг. показал, что доля проб воды поверхностных источников, не соответствующих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, находится на одном уровне с долей не соответствующих нормативам проб из подземных источников, а по микробиологическим показателям более чем в пять раз превышает уровень загрязнения подземных источников.

За период 2011–2020 гг. в Российской Федерации качество воды водоемов I категории, используемых в качестве источников питьевого и хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также для водоснабжения предприятий пищевой промышленности, ухудшилось по санитарно-химическим показателям. Доля проб воды, не соответствующих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, увеличилась на 8,27% и составила в 2020 г. 30,34%.

Обеззараживание воды на водопроводах может быть достигнуто применением физических (безреагентных), химических (реагентных) и комбинированных (физико-химических) методов.

Метод обеззараживания воды следует выбирать с учетом следующих факторов:<sup>58</sup>

- качество воды;
- эффективность очистки воды;
- надежность обеззараживания;
- технико-экономические показатели;
- возможность автоматизации процесса.

Несмотря на многообразие методов обеззараживания воды, на практике применяются немногие. Самое широкое распространение получили хлорирование, озонирование, УФ-обеззараживание. В таблице 11 приведен сравнительный анализ методов по основным показателям.

---

<sup>58</sup> *Мазаев В. Т. и др.* Коммунальная гигиена : учеб. пособие : в 2 ч. — Ч. 1. Коммунальная гигиена. — М. : ГЭОТАР-Медиа, 2005.

Таблица 11. Сравнение основных методов обеззараживания

Фактор	Хлорирование	Озонирование	УФ-обеззараживание
Механизм действия	Химическое взаимодействие дезинфектанта с органоидами клетки	Окисление	Нарушение структуры ДНК и РНК клетки под воздействием биологически активной части спектра
Физико-химические свойства исходной воды: мутность, цветность	Повышенное содержание органических загрязнений, увеличение хлороемкости воды	Отсутствие влияния	Значительное снижение эффективности процесса
Вторичное загрязнение	Пролонгирующее действие	Возможно вторичное загрязнение	Возможно вторичное загрязнение
Вероятность образования высокотоксичных продуктов	Возможно образование хлорорганических соединений	Возможно образование токсичных органических соединений: альдегидов, кетонов и т. д.	Отсутствие образования
Влияние на органолептические свойства питьевой воды	Появление характерного запаха	Улучшение	Улучшение
Эффективность в отношении: бактерий, вирусов, простейших	Низкий бактерицидный эффект относительно простейших	Эффективность относительно всех видов микроорганизмов	Эффективность относительно всех видов микроорганизмов

Рассмотрим детально основные и побочные методы.

### ***Физические методы обеззараживания***

Физические методы исключают применение реагентов и основаны только на механическом воздействии. Бактерицидными свойствами обладает воздействие ультрафиолетовым излучением, гамма-излучением, ультразвуком, импульсом электрического разряда.

#### *Ультрафиолетовое обеззараживание*

Впервые метод ультрафиолетового обеззараживания был применен на станциях обработки артезианской воды во Франции и Германии в 1911 г. В России данный метод обеззараживания эффективно внедрялся в 50–70-х гг. XX столетия. В настоящее время метод широко применяется на станциях водоподготовки во всем мире.

Ультрафиолетовое излучение (УФИ, UV) — электромагнитное излучение, занимающее диапазон между видимым и рентгеновским излучением (10–400 нм,  $7,9 \cdot 10^{14}$ – $3 \cdot 10^{16}$  Гц). Основой обеззараживающего действия УФ-излучения является воздействие биологически активной части спектра,

находящейся в диапазоне длин волн от 205 до 315 нм, на микроорганизмы. Наиболее эффективным является диапазон 250–270 нм<sup>59</sup>.

Механизм бактерицидного действия ультрафиолетового излучения принципиально отличается от окислительных технологий. Поглощение УФ-фотонов вызывает изменение в структуре ДНК и РНК, тем самым лишая микроорганизмы способности к воспроизводству. Многие микроорганизмы вызывают инфекционные заболевания, поэтому способность УФ-излучения инактивировать микроорганизмы была востребована в медицине с момента открытия этого эффекта. Процесс начинается с поглощения УФ-фотонов в данном микроорганизме.

- При чрезвычайно высокой облученности поверхности УФ-излучением (1–10 кВт/см<sup>2</sup>) бактерии или другие микроорганизмы поглощают столь много энергии, что их температура поднимается выше 130°С, происходит перегрев микроорганизмов и их термическое разрушение вплоть до разрыва оболочки внутренним давлением.
- При средних уровнях плотности УФ-излучения термическая деструкция не происходит, однако если мощность еще достаточно высока, то поглощение УФ-излучения внешними мембранами протеиновых клеток в конечном итоге приводит к разрушению этих мембран и смерти клеток, возникающей из-за вытекания протоплазмы.
- При низких уровнях облученности УФ-излучением и низких полученных дозах механизм инактивации нетермический, а УФ-излучение действует на молекулярном уровне, когда поглощение УФ-фотонов ДНК и РНК может нарушить способность микроорганизмов к воспроизводству. Вследствие невозможности размножения они не могут вызывать заболевания. Необратимые повреждения нуклеиновых кислот, а именно ДНК и РНК микроорганизмов, вирусов (в том числе и коронавируса) за счет фотохимического воздействия обуславливает разрыв или изменение химических связей органической молекулы: тимин и цитозин, входящие в состав ДНК, под действием излучения образуют димеры, которые делают невозможным удвоение нуклеиновых кислот клетки, а соответственно, и ее размножение.

При определении оптимальной дозы помимо физико-химических свойств воды также учитывают различную устойчивость микроорганизмов к действию УФ-лучей<sup>60</sup>. Так, для инактивации 99,9% микроорганизмов в лабораторных условиях дозы облучения колеблются от 5,2 мДж/см<sup>2</sup> для шигеллы Флекснера до 11 мДж/см<sup>2</sup> для гепатита А. Поэтому в расчет дозы включают коэффициент сопротивляемости более устойчивых к воздействию излучения микроорганизмов.

<sup>59</sup> Чернинский С. Н., Трахтман Н. Н. Обеззараживание питьевой воды. — М. : Медгиз, 1962; Соколов В. Ф. Обеззараживание воды бактерицидными лучами. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Стройиздат, 1964; Микаева С. А., Микаева А. С. Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением // Автоматизация и современные технологии. — 2014. — № 11. — С. 8–11.

<sup>60</sup> Мазаев В. Т. и др. Коммунальная гигиена. — Ч. 1.

Источниками УФ-излучения, реально широко применяемыми в промышленности для обработки средних и больших объемов воды, остаются две категории ламп на основе разряда в парах ртути: это лампы низкого давления (в том числе амальгамные) и лампы среднего давления. Другие типы (импульсные ксеноновые, DBD, эксимерные, ВЧ-безэлектродные и т. п.) в силу совокупности их свойств (КПД, ресурс, цена и т. д.) представляют перспективу только для специального применения.

Место расположения УФ-блока обработки воды в технологической цепи определяется многими факторами: прежде всего целями всего комплекса очистки воды, собственно задачами обеззараживания, общей технологией, ее возможностями.

Для характеристики проницаемости воды для ультрафиолетовых лучей используется такой показатель как коэффициент светопропускания. Коэффициент светопропускания показывает (в долях или процентах), какая часть излучения с данной длиной волны проходит через слой воды толщиной 1 см.

Точный расчет технических параметров, включающий в себя все необходимые параметры эффективности процесса, является обязательным условием успешного обеззараживания воды.

Ультрафиолетовое излучение можно использовать при предварительном и заключительном обеззараживании воды.

Преимущества метода:

- высокая эффективность обеззараживания в отношении широкого спектра микроорганизмов, в том числе устойчивых к хлорированию микроорганизмов, вирусов и цист простейших; при этом, начиная с пороговых доз 25–40 мДж/см<sup>2</sup>, процессы реактивации практически отсутствуют;
- отсутствует влияние на физико-химические и органолептические свойства воды, не образуются побочные продукты, нет опасности передозировки;
- низкие капитальные затраты, низкое энергопотребление и низкие эксплуатационные расходы;
- УФ-установки компактны и просты в эксплуатации, не требуют специальных мер безопасности и высокой квалификации персонала.

Недостатки метода:

- нет эффекта последействия (поэтому в системах подготовки питьевой воды часто сочетают УФ-облучение с химическими окислителями);
- не весь ультрафиолетовый диапазон подходит для обеззараживания, здесь работает очень узкая часть спектра, как показано на рисунке 45.

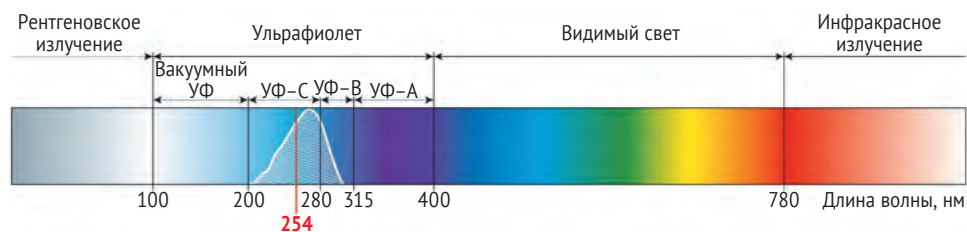


Рис. 45. Спектр излучений

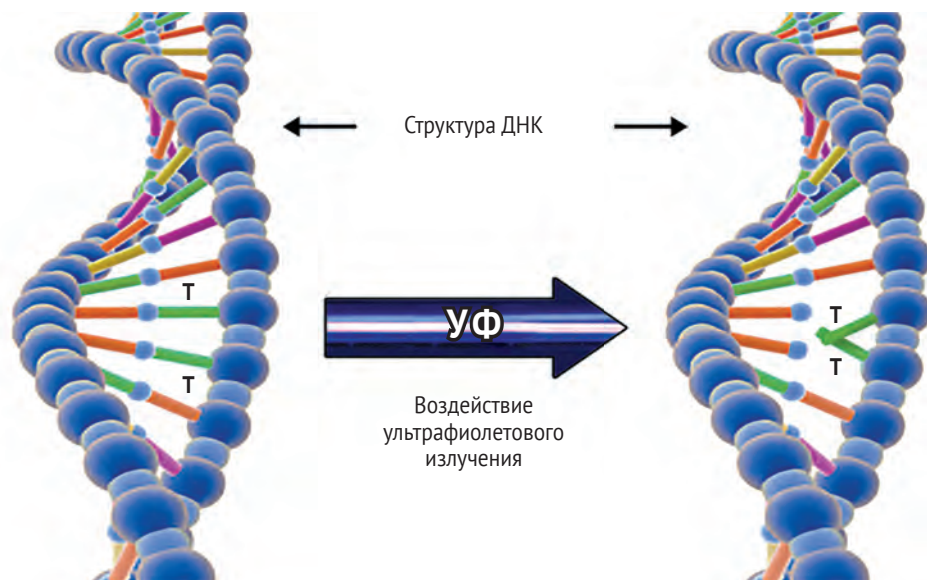


Рис. 46. УФ-излучение

При выборе оборудования для УФ-облучения (рис. 46) необходимо основываться на параметрах, представленных на рисунке 47.



Рис. 47. Параметры для выбора УФ-оборудования

*Радиационное, ультразвуковое обеззараживание.*

*Обеззараживание импульсными электрическими зарядами*

Первые исследования, посвященные радиационной обработке воды, были проведены в 1960-е гг. Было выявлено, что для обработки природной воды требуются относительно небольшие дозы, что говорит о конкурентоспособности метода. К тому же при облучении воды разлагаются токсичные и канцерогенные хлорсодержащие органические соединения, содержащиеся в ней: 1,2-дихлорфенол, 1,1,1-трихлорэтан, трихлорэтилен, хлорбензол, 4-хлорфенол и т. д.<sup>61</sup>

<sup>61</sup> Подзорова Е. А. Комбинированные радиационные методы очистки воды и сточных вод : дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.09. — М., 2001.

Поскольку существует эмпирическая закономерность, согласно которой радиочувствительность живых организмов растет с их сложностью, следует ожидать, что среди живых организмов бактерии и вирусы наименее чувствительны к его воздействию. Полулетальная доза, при которой погибает значительная часть бактерий, находится в области 40 000–50 000 рад.

Поразительный эффект оказывает увеличение мощности дозы. Так, мощность дозы  $\gamma$ -излучения  $^{20}\text{Co}$  варьировалась в пределах 2–666 рад/с. В интервале 2–19 рад/с влияние мощности не наблюдалось, и летальной оставалась доза в 50 000 рад. Однако при увеличении мощности с 19 до 666 рад/с летальная доза снизилась до 25 000 рад. Это объясняется увеличением концентрации свободных радикалов, образующихся при радиолитизе воды.

Несмотря на свою эффективность, обеззараживание гамма-излучением питьевой воды на станциях водоподготовки не применяется из-за высокого требования к технике безопасности и отсутствия пролонгирующего действия.

Другим безреагентным методом обеззараживания воды является ультразвуковая (УЗ) обработка. Преимуществом применения данного метода обеззараживания перед остальными является его нечувствительность к таким факторам, как высокая мутность и цветность воды, количество микроорганизмов и присутствие в воде растворенных веществ.

Ультразвук обладает обеззараживающим действием, которое основывается на механическом разрушении клеточной оболочки бактерии за счет акустической кавитации. Данное явление возникает при прохождении звуковых волн высокой интенсивности и амплитуды звукового давления, превышающего некоторое пороговое значение, и заключается в образовании в жидкости полостей, заполненных газом. Кавитационные пузырьки захлопываются во время полупериодов сжатия, создавая кратковременные импульсы давления до  $10^8$  Па и выше, способные разрушить даже весьма прочные материалы<sup>62</sup>.

Для обеспечения эффективного обеззараживания учитывают интенсивность ультразвука и частоты колебаний. Оптимальный диапазон частоты 18–44 кГц, рабочий интервал интенсивности составляет 0,5–10 Вт/см<sup>2</sup>.

Бактерицидный эффект не зависит от мутности и цветности воды и распространяется не только на вегетативные, но и на споровые формы микроорганизмов.

Преимущества метода:

- эффективность не зависит от физико-химических свойств воды;
- высокая степень обеззараживания;
- ликвидация бактериального налета и помутнений;
- удаление водородсодержащих;
- не изменяет органолептических свойств воды<sup>63</sup>.

<sup>62</sup> Чернинский С. Н., Трахтман Н. Н. Обеззараживание питьевой воды...

<sup>63</sup> Сахарова А. А., Косьянова Э. А. Очистка и обеззараживание воды с помощью ультразвука // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : материалы VIII Всероссийской (с международным участием) науч.-техн. конф. молодых исследователей, Волгоград, 19–24 апреля 2021 года. — Волгоград, 2021. — С. 254–256.

Недостатки метода:

- трудности в разработке установок большой производительности, которые будут конкурентоспособными наряду с другими методами;
- высокая стоимость уже разработанного оборудования;
- отсутствие нормативно подтвержденных критериев и методов контроля эффективности процесса обеззараживания.

Перспективным методом физического обеззараживания воды является применение электрических разрядов. Активные исследования в данной сфере начались в XX в. после того, как советский физик Л. А. Юткин впервые описал явление электрического заряда в жидкости, которое впоследствии назвал электрогидравлическим эффектом. Суть эффекта заключается в том, что электрический заряд в жидкости создает большое гидравлическое давление, которое способно оказывать существенное силовое воздействие. Также в результате данного воздействия происходят структурные изменения воды, приводящие к появлению активных свободных радикалов, атомарных кислорода и водорода, соединений азота и простейших аминокислот. Осуществлению этих процессов способствуют воздух и другие газы, растворенные в воде. При этом содержащиеся в ней бактерии погибают. Это связывают с ультразвуковым, ультрафиолетовым и рентгеновским излучениями плазмы канала разряда и с мощным окисляющим действием атомарного кислорода.

Основой системы, создающей импульсный электронный заряд, являются электроды, между которыми происходит выделение большого количества энергии. Эффективность процесса не зависит от состава обрабатываемой воды, а определяется вложенной энергией. По данным экспериментов наиболее эффективным следует считать жесткий режим (60 кВ)<sup>64</sup>.

Преимущества метода:

- исключает вторичное бактериальное загрязнение;
- обладает ярко выраженным бактерицидным эффектом.

Недостатки метода:

- высокие энергозатраты;
- сложность технического оборудования.

Исследования и разработки ведутся в направлении использования в целях обеззараживания воды эффекта гидродинамической кавитации. Метод основан исключительно на физическом воздействии, происходящем при схлопывании кавитационных пузырьков: повышение температуры до 500°С и давлении 4000 МПа, которые вызывают разрушительные последствия для микроорганизмов.

В 2017 г. был получен патент на разработку полезной модели «Мобильная установка для обеззараживания и очистки воды», основанной на данном методе обеззараживания. Несмотря на то что пока речь идет об очистке воды для обеспечения индивидуальных нужд или нужд небольшой группы людей,

---

<sup>64</sup> Добромиров В. Н. и др. Технология обеззараживания жидкостей на основе электрогидравлического эффекта // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — № 2 (78). — С. 17–23.



преимущества данного метода служат хорошей основой для дальнейших работ, которые позволят применять его в промышленных масштабах.

### *Электролиз воды*

С целью использования электрического тока для обеззараживания воды были изучены: влияние постоянного электрического тока на вегетативные и споровые формы микроорганизмов в воде, электрический разряд малой мощности, электролиз воды. Как наиболее активный детально изучен и внедряется в практику электрохимический способ обеззараживания воды, активно действующим веществом которого являются продукты электролиза<sup>65</sup>.

В настоящее время разработаны два способа применения электролиза для обеззараживания воды. При первом способе получение бактерицидных продуктов и обеззараживание происходят непосредственно при электролизе зараженной воды. Этот способ может быть использован для обеззараживания воды с высоким содержанием хлоридов. При втором способе в обеззараживаемую воду вводят в определенной дозе электролизированный раствор хлористого натрия или солянокислотных подземных вод. При одновременном разряде на аноде или катоде образуется гипохлорит натрия.

Эффективность обеззараживания воды электрохимическим способом выше химического; интенсивность отмирания бактерий, особенно в первые 5–10 мин после прохождения анодной камеры, больше, чем при обработке химическими реагентами. Интенсивность отмирания спор при обеззараживании водопроводной и прудовой воды электрохимическим способом выше, чем при обработке химическими средствами. Интенсивность отмирания спор как при электрохимическом, так и при химическом способе определяется концентрацией активного хлора, временем контакта и значением pH.

Изучение активности продуктов электролиза хлористого натрия при обеззараживании воды показало, что бактерицидная активность их при массивном заражении воды кишечной палочкой  $((1,85-2,65) \times 10^8)$  не отличается от активности хлорирования газообразным хлором. На споры антракоида и сибиреязвенной палочки продукты электролиза хлористого натрия действуют активнее йода, ДТСГК, но менее активны, чем газообразный хлор.

### *Термический метод*

Термический метод обработки является одним из самых древних и доступных способов стерилизации воды. Широко распространен в быту, однако практически неприменим в промышленных условиях в связи с высокой стоимостью и устойчивостью некоторых микроорганизмов к температурному воздействию.

<sup>65</sup> Соколова Н. Ф. и др. Влияние постоянного тока на вегетативные и споровые формы микроорганизмов в воде. Проблемы обеззараживания и стерилизации. — М.: Наука, 1972. — С. 8–12.

Механизм бактерицидного действия основывается на том, что белки многих клеток денатурируют при повышенной температуре<sup>66</sup>.

### *Комбинированные методы обеззараживания*

Дальнейшее развитие технологий обеззараживания питьевой воды, обусловленное стремлением повысить эффективность и снизить затраты, способствовало появлению комбинированных методов обеззараживания питьевой воды. Данные методы сочетают физическое и химическое воздействия или же несколько типов одного вида воздействия. Так, эффективным методом обеззараживания воды является многостадийное обеззараживание питьевой воды, включающее в себя сначала обработку хлорсодержащими реагентами, затем УФ-обработку в диапазоне длин волн 200–400 нм при частоте 1,0–1,3 Гц.

Перспективным является совместное применение ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки воды. Подтверждено, что комбинация данных воздействий приводит к синергетическому росту эффективности обеззараживания. За счет особенностей ультразвукового воздействия обеспечивается:<sup>67</sup>

- предотвращение биообрастания поверхности чехлов ламп и отложения солей на них;
- равномерная обработка воды благодаря интенсивному перемешиванию;
- дробление взвешенных веществ.

Перспективным также является применение УЗ-обработки в сочетании с пероксидом водорода. В этом случае ультразвук воздействует на пероксид, генерируя при этом высокореакционноспособные гидроксильные радикалы<sup>68</sup>.

### *Химические методы обеззараживания*

Методы, основанные на окислительном действии реагентов, называют химическими. К ним относят хлорирование, озонирование, олигодинамию, обеззараживание йодом и бромом и т. д.

#### *Озонирование*

Альтернативой хлорированию и УФ-обеззараживанию воды является обработка воды озоном. Озонирование как метод обеззараживания воды стало развиваться несколько позднее хлорирования. Впервые данный метод для

---

<sup>66</sup> Кулагин С. М. и др. Устойчивость возбудителя Ку-лихорадки к некоторым физическим и химическим агентам // ЖМЭИ. — 1956. — № 7. — С. 28–32.

<sup>67</sup> Лебедев Н. М. и др. Испытание комбинированного способа ультрафиолетового и ультразвукового обеззараживания сточных вод // Экология и промышленность России. — 2019. — № 7 (23). — С. 26–30.

<sup>68</sup> Астахова С. А. Обеззараживание воды высокочастотным ультразвуком в присутствии пероксида водорода // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. — 2013. — № 3. — С. 71–74.

очистки воды был применен во Франции в 1907 г. В России в 1911 г. в Петербурге была запущена в эксплуатацию самая крупная производственная установка озонирования, обрабатывающая 44 500 м<sup>3</sup>/сут.

В настоящее время применение озона для очистки питьевой воды имеет широкое распространение, в том числе в таких странах, как Франция, Канада, Швейцария, Италия, Германия, Саудовская Аравия и др.

Озон — газ бледно-голубого цвета, обладающий характерным запахом. Это один из сильнейших окислителей; в воде при растворении образуется атомарный кислород, который, в свою очередь, и осуществляет окисление.

Озон получают непосредственно на водопроводных станциях в озонаторах путем воздействия на предварительно подготовленную воздушную смесь электрическим разрядом 5000–25 000 В. Подготовленная озоновоздушная смесь поступает в барботажные колонны, где происходит ее контакт с очищаемой водой<sup>69</sup>. При разложении молекулы озона образуются атом и молекула кислорода, в качестве промежуточных продуктов реакции образуются радикалы HO<sub>2</sub>, OH. Именно молекулярный кислород и свободные радикалы определяют бактерицидные свойства озона<sup>70</sup>.

Дезинфицирующее действие озона на некоторые формы бактерий более выражено, чем у хлора: в 15–20 раз — на вегетативные формы, в 300–600 раз — на споровые.

Механизм бактерицидного действия озона заключается в том, что он вступает в реакцию окисления с липидами и липопротеинами, из которых состоит стенка бактерий. В результате окисления данных веществ образуются новые угловые конфигурации связей, которые несовместимы с жизнеспособностью клетки. В некоторых случаях озон, проникая через мембрану клетки, взаимодействует с содержимым цитоплазмы, разрушает кольцевую плазмиду ДНК, делая дальнейшее деление клетки невозможным<sup>71</sup>.

Чтобы отразить эффективность обеззараживания воды озоном в зависимости от ее качества, ввели понятия: озон-брутто — общий расход озона на 1 л воды; озон-нетто — количество озона, поглощенное водой; остаточный озон — количество непоглощенного озона, обнаруживаемое в обеззараженной воде методом титрования. Эффективным считается то количество остаточного озона, которое обеспечивает обеззараживание воды применительно к конкретной обстановке — степени загрязнения озонируемой воды и резистентности патогенных микроорганизмов. Для озонирования очищенной воды требуется 1 мг/л озона, а для загрязненной — 3–6 мг/л. Резистентность патогенных микроорганизмов к озону зависит от их вида. Озон активен в отношении бактерий, вирусов, риккетсий, спор микроорганизмов. Эффективные концентрации остаточного озона колеблются от 0,05 до 3,50 мг/л. Поскольку озон является высокотоксичным веществом, его остаточная концентрация

<sup>69</sup> Кожин В. Ф. Установки для озонирования воды. — М. : Стройиздат, 1968.

<sup>70</sup> Лунина В. В. и др. Физическая химия озона / под ред. чл.-корр., проф. В. В. Лунина. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1998.

<sup>71</sup> Кожин В. Ф., Кожин И. В. Озонирование воды. — М. : Стройиздат, 1974.

при озонировании нормируется СанПиН 1.2.3685-21 и должна не превышать 0,1 мг/л<sup>72</sup>.

Озонирование (рис. 48) целесообразно применять как заключительный этап водоподготовки, т. к. при наличии большой концентрации органических веществ в результате взаимодействия их с озоном могут образовываться высокотоксичные соединения.

Преимущества метода:

- сильное бактерицидное, вирулицидное действие;
- высокая скорость обеззараживающего действия.

Недостатки метода:

- возможность вторичного загрязнения;
- большие затраты электроэнергии;
- низкая растворимость озона в теплой воде;
- сложность оборудования;
- высокая токсичность озона, возможность образования токсичных соединений.

Следует отметить, что применение озона не исключает необходимости хлорирования воды, т. к. озонирование не имеет пролонгированного действия. Использование озона в технологии очистки воды имеет ряд особенностей. Теоретически без соответствующих экспериментальных исследований не всегда эффект воздействия озона на обрабатываемую воду может быть предсказуем. Он может приводить к результатам, совершенно противоположным ожидаемым, в зависимости от различных условий — качества обрабатываемой воды, состава очистных сооружений и других факторов. Поэтому, и это следует особо подчеркнуть, целесообразность применения озона в качестве дезинфектанта не всегда очевидна.

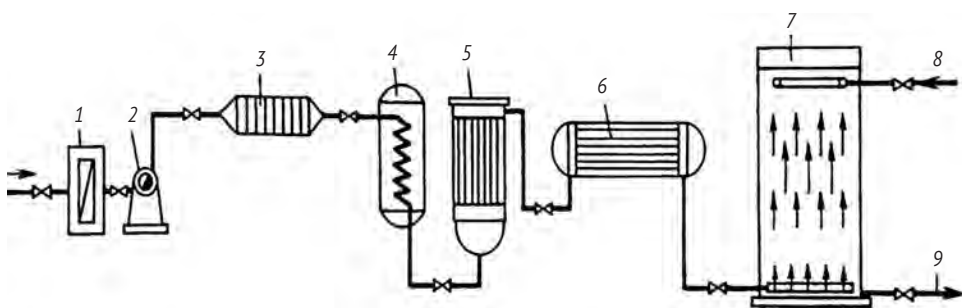


Рис. 48. Схема озонаторной установки:

1 – воздушный фильтр; 2 – воздушная подушка; 3 – водяной теплообменник; 4 – фреоновая холодильная установка; 5 – влагопоглотительный фильтр; 6 – озонатор; 7 – контактный резервуар; 8, 9 – подача исходной и отвод озонированной воды

<sup>72</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утвержден и введен в действие Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.07.2000 № 554. Дата введения: 28.01.2021 / подготовлен главным государственным санитарным врачом РФ. — М. : Стандартинформ, 2017.

### Обеззараживание перекисью водорода и галогенами

После освоения химической промышленностью новой технологии получения в больших количествах в достаточно чистом и устойчивом виде водного раствора перекиси водорода изучение ее для обеззараживания продолжается<sup>73</sup>. Рассмотрим данное соединение в качестве обеззараживающего реагента.

Преимущество перекиси водорода как средства обеззараживания воды в том, что она является сильным окислителем и при ее разложении образуются вещества ( $H_2O + O$ ), не ухудшающие качества воды. Детальное исследование бактерицидных, вирулицидных, спороцидных свойств перекиси водорода при обеззараживании воды показало, что активность перекиси водорода зависит от вида микроорганизмов и их количества.

Понижение температуры от 18–20 до 1–4°С отрицательно сказывается на активности перекиси водорода, особенно при массивном заражении воды микроорганизмами, при небольших дозах перекиси водорода и кратковременном контакте. Повышение дозы перекиси водорода и увеличение времени контакта нивелирует неблагоприятное влияние низких температур.

При повышении рН воды активность перекиси растет; она наиболее активна при рН = 8,0–8,4. Для обеззараживания воды, содержащей кишечную палочку, в течение 30 мин при рН = 5,3 требовалось перекиси водорода 5,3 мг/л, а при рН = 8,4–1,5 мг/л. Чем выше окисляемость воды и ниже ее прозрачность, тем большая доза перекиси водорода требуется для ее обеззараживания. Оптимальной дозой, обеспечивающей обеззараживание воды, соответствующей требованиям ГОСТа к воде водоисточников, является доза 3 мг/л при контакте 30 мин; остаточная концентрация перекиси водорода при этом должна составлять не более 0,6–0,7 мг/л<sup>74</sup>.

В ряду галогенов бактерицидными свойствами обладают хлор, бром, йод. Однако широкое распространение получило только хлорирование. Бром и йод не применяются для обеззараживания питьевой воды в силу следующих особенностей:

- йод недостаточно эффективен при воздействии на микробные токсины и фенольные соединения;
- при растворении йода в воде она приобретает специфический запах;
- бромирование требует сложного технического обеспечения, поэтому является дорогостоящим.

Эти и другие факторы сделали йодирование и бромирование неконкурентоспособными методами обеззараживания воды по отношению к хлорированию и другим широко применяемым методам, таким как озонирование, УФ-обеззараживание. Однако йодирование применяется для обеззараживания

<sup>73</sup> Батарова Н. А. Бактерицидные, вирулицидные и спороцидные свойства перекиси водорода и возможности практического ее применения для обеззараживания воды : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Ленингр. сан.-гигиен. мед. ин-т. — Л., 1965; Самойленко Н. И. и др. Механизм действия перекиси водорода // Микробиология, эпидемиология и иммунология. — 1983. — № 2. — С. 30–32.

<sup>74</sup> Соколова Н. Ф. Средства и способы обеззараживания воды... Т. 1; Батарова Н. А. Бактерицидные, вирулицидные и спороцидные свойства перекиси водорода...

индивидуальных или небольших групповых запасов воды в полевых условиях: бактерицидный эффект достигается при концентрации йода 0,3–1,0 мг/л, вирулицидный — 0,5–2,0 мг/л при времени контакта 20–30 мин.

Еще одним эффективным, но не получившим широкого распространения методом является олигодинамия. Сущность данного метода заключается в инактивации ферментных групп бактерий малыми концентрациями положительных ионов металлов. К таким металлам относятся медь и серебро, бактерицидные свойства которых были известны еще в древности.

Сдерживающими факторами в данном случае являются:

- высокая стоимость металлов;
- длительное время контакта;
- значительная зависимость бактерицидного эффекта от pH, температуры, мутности, присутствия веществ, способных вступать с серебром в комплексные соединения;
- значения ПДК металлов в воде, установленные по токсикологическому признаку вредности, на порядок ниже эффективных по бактерицидному действию концентраций.

### *Хлорирование*

Хлорирование — первый метод, который стали применять в системах водоочистки, и до сих пор самый распространенный. Если вначале в качестве обеззараживающего реагента использовалась только хлорная известь, сейчас это целый спектр различных веществ: жидкий хлор, хлорная известь, гипохлорит натрия и кальция, хлорит натрия, диоксид хлора, органические и неорганические хлорамины. На сегодняшний день получаемые электролизом хлорсодержащие реагенты на месте использования являются наиболее широко применяемыми реагентами для обеззараживания воды.

Существенный вклад в развитие технологий хлорирования воды в СССР внес Л. А. Кульский, работа которого «Обезвреживание и очистка воды хлором» была в основном подготовлена на протяжении 1930-х гг. и послужила основой для массового применения технологий обеззараживания воды различными видами хлора, включая электролизный гипохлорит натрия и хлорамины. Приведем некоторые исторические сведения из этой работы.

Мировой опыт применения различных форм хлора в технологических процессах обеззараживания воды на сегодняшний день насчитывает более 100 лет. Стимулом для внедрения технологий обеззараживания воды послужили, как уже указывалось, эпидемии холеры и брюшного тифа, бушевавшие в Европе в конце XIX в. Первые успешные опыты по обеззараживанию сточной воды хлорной известью были выполнены в Гамбурге в 1892 г. во время эпидемии холеры. Теоретической основой для обоснования бактерицидной эффективности хлора послужили выполненные в этот же период экспериментальные работы М. Траубе, Р. Коха, Х. Ниссена. Понятные трудности с получением, обращением и дозированием хлорной извести послужили поводом для поиска более безопасных и удобных способов применения других форм хлора.

Первые результаты успешного применения газообразного хлора опубликованы Э. Фельбсом в 1906–1907 гг.

К 1910 г. была разработана удачная конструкция промышленного аппарата-хлоратора, на основе которого технология обеззараживания газообразным хлором начала быстро развиваться в США, Англии, Германии. Важной основой быстрого распространения такого способа обеззараживания стали успехи в создании промышленных технологий получения и хранения газообразного и жидкого хлора, которые были связаны с работами над получением боевых отравляющих веществ (ОВ) в период подготовки к Первой мировой войне. К середине 1930-х гг. в Лос-Анджелесе эксплуатировалась и первая автоматическая установка дозирования хлора, позволявшая поддерживать заданную концентрацию не только в зависимости от расхода воды, но и в зависимости от ее хлоропоглощения. Основной частью системы был автоматический анализатор остаточного хлора, работающий по калориметрическому принципу. Анализатор один раз в 3 мин проводил измерение остаточной концентрации хлора. Если текущее значение концентрации отличалось от заданного значения, в электрической схеме возникал дисбаланс по току, и этот токовый сигнал поступал на регулирующий вентиль с реверсивным электрическим приводом.

В России раствор хлорной извести впервые был применен в системах централизованного водоснабжения в период эпидемии холеры 1910 г. на водопроводной станции Кронштадта и на ярмарочном водопроводе в Нижнем Новгороде. Эффективность проведенных мероприятий дала толчок внедрению хлорирования в крупных городах. В Петербурге в 1911 г. на вновь построенной Петроградской фильтровальной станции, а в 1913 г. и на Главной станции хлорирование стало обязательным технологическим процессом. В период 1914–1918 гг. хлорирование получило массовое распространение и для малых населенных пунктов в связи с необходимостью оперативно проводить мероприятия по предотвращению возникновения эпидемий в местах скопления больших войсковых соединений. Развитие производства хлора в период войны обеспечило его относительную дешевизну и доступность.

Массовое применение газообразного хлора в России началось в 1928–1929 гг., когда советская промышленность начала выпускать собственные аппараты для дозирования. С началом Второй мировой войны в условиях военного времени в СССР стали использоваться и электролитические гипохлоритные установки, позволяющие получать дезинфектант из поваренной соли непосредственно на месте применения. В этот же период стали понятны и основные технологические параметры процесса хлорирования. В частности, многие исследователи отмечали, что для поверхностных вод с обычным уровнем бактериологической загрязненности остаточная концентрация хлора 0,5 мг/л при времени контакта 30 мин полностью обеспечивает санитарные требования к бактериологическому качеству воды. Параллельно были отработаны и методы контроля концентрации хлора в воде, в частности, широко применяемые сегодня йодометрический и калориметрические.

К началу 1930-х гг. были проведены многочисленные исследования по оценке влияния аммонизации на эффект хлорирования воды. Среди достигаемых эффектов исследователи выделяли: снижение расхода хлора, устранение неприятного вкуса и запаха воды, отсутствие «послероста» бактерий. В частности, в 1930 г. К. К. Боголюбов для обеспечения стабильного и продолжительного бактерицидного эффекта рекомендовал для воды весовое соотношение  $\text{Cl}_2 : \text{NH}_3$ , равное 4 : 1. Он отмечал, что при таком соотношении скорость бактерицидного действия несколько замедляется, однако при времени контакта 1 ч бактерицидный эффект хлораммонизации равен, а при 2 ч превосходит эффект обычного хлорирования.

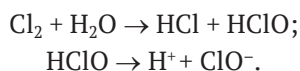
К 1936 г. в СССР стали серийно выпускаться вакуумные хлораторы ЛК-3 конструкции Л. А. Кульского, которые имели ряд преимуществ по сравнению с зарубежными аппаратами и были приспособлены для работы в составе автоматических систем дозирования.

К концу 1930-х гг. в СССР была разработана классификация методов применения хлора на основе целей процесса. Постхлорирование — введение хлора в обрабатываемую воду на конечном этапе водоподготовки, когда целью хлорирования является только обеззараживание. Прехлорирование — введение хлора в начале процесса очистки — является вспомогательным этапом, когда хлор помимо целей обеззараживания используется для улучшения качества коагуляции, фильтрации, отстаивания и обесцвечивания воды. Следует отметить, что в основу классификации легли исключительно экономические соображения. Прехлорирование рекомендовалось только тогда, когда перерасход хлора на хлоропоглощение сырой воды был оправдан с точки зрения достижения экономического эффекта от снижения расхода других реагентов, применяемых в процессе очистки.

Таким образом, мировой опыт использования различных форм хлора с целью обеззараживания воды имеет богатую историю и обоснован как фундаментальными исследованиями, так и практическими достижениями.

Жидкий хлор поступает на водопроводные станции в цистернах или баллонах под высоким давлением. Однако в целях снижения рисков, связанных с использованием, транспортировкой и хранением сжиженного хлора многие очистные станции переходят на гипохлорит натрия, который применяют в виде привозного концентрированного раствора или низкоконцентрированного раствора, производимого прямо на водопроводной станции методом электролиза поваренной соли. Отметим, что сейчас ведутся разработки получения хлорной воды путем мембранного электролиза на месте потребления. Эффективность обеззараживания воды концентрированным раствором гипохлорита натрия или жидким хлором является одинаковой.

В результате взаимодействия жидкого хлора с водой образуется хлорноватистая кислота, которая в щелочной среде диссоциирует и образует ион водорода и гипохлорит:





Дезинфицирующее действие гипохлорита натрия схоже с действием жидкого хлора: соль, растворяясь в воде, диссоциирует, образуя хлорноватистую кислоту, которая оказывает непосредственное окисляющее и дезинфицирующее действие:

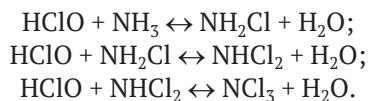


Выделяют хлор свободный (молекулярный хлор, хлорноватистую кислоту и гипохлорит-ионы), и связанный, входящий в состав хлораминов. Для гарантии обеззараживающего действия в воде поддерживают остаточные концентрации свободного или связанного хлора.

Процесс обеззараживания воды хлором протекает в две стадии: сперва хлор проникает через оболочку клетки, после чего он взаимодействует с ферментами клетки. Хлор блокирует SH-группы, тем самым уничтожая дыхательные цепи бактерий. Лимитирующими факторами процесса являются кинетика диффузии хлора внутрь клетки и интенсивность отмирания клеток вследствие воздействия реагента. Общую скорость процесса можно увеличить путем увеличения концентрации хлора в воде, повышением ее температуры и переводом хлора в относительно легко диффундирующую недиссоциированную форму.

При обеззараживании воды хлором надо учитывать, что на бактерицидное действие хлора также влияют значение pH воды и наличие в ней способных к окислению органических соединений, восстановителей, а также коллоидных и взвешенных веществ, обволакивающих бактерии.

Тот факт, что после хлорирования в результате окисления органических и неорганических примесей могут образовываться токсичные хлорорганические соединения и что лишь небольшая доза хлора идет на обеззараживание, остальное же идет на окисление примесей, определил необходимость использования технологии аммонирования воды, в процессе которой свободный хлор связывается в хлорамины. Так, хлор, гипохлоритная кислота и гипохлориты взаимодействуют с присутствующими в воде аммиаком, аммонийными или органическими солями, содержащими аминогруппы. В результате их реакции образуются моно-, дихлорамины, треххлористый азот:<sup>75</sup>



Полученные соединения также имеют бактерицидные свойства, поскольку их гидролиз приводит к образованию активного хлора. Однако они являются более устойчивыми в воде, чем хлор, что снижает риск образования токсичных соединений.

<sup>75</sup> Говорова Ж. М. и др. Обоснование применения аммонизации природной воды, содержащей органические вещества // Системные технологии. — 2020. — № 1 (34). — С. 17–20.

На водоочистных станциях применяют аммиачную воду (25 %) или сульфат аммония, концентрированный раствор которого доставляют в специальных цистернах. Концентрация активного вещества в растворе составляет не менее 38 %.

Оптимальное соотношение  $\text{Cl} : \text{NH}_3$  для каждого конкретного образца воды устанавливается на основании пробных хлорирований, проводимых по сезону года.

На бактерицидный эффект хлорирования в значительной степени влияют начальная доза хлора и продолжительность сохранения в воде его некоторой остаточной концентрации. Количество хлора, поглощаемое примесями, определяется как хлоропоглощаемость воды. Данный показатель следует учитывать при определении оптимальной дозы, которая при заданном времени контакта обеспечит в воде требуемую концентрацию остаточного хлора. Необходимая доза гипохлорита натрия определяется на основе экспериментально построенной кривой хлоропоглощаемости воды. Доза остаточного хлора нормируется СанПиН 1.2.3685-21 и находится в пределах 0,8–1,2 мг/м<sup>3</sup> по связанному хлору, по свободному — 0,3–0,5 мг/л при времени контакта 60 мин<sup>76</sup>.

Наличие хлораминов в воде, подаваемой на значительные расстояния по водопроводным сетям, позволяет предотвратить повторное бактериальное загрязнение, увеличить пролонгирующее действие остаточного хлора в воде в течение заданного времени в пределах необходимой концентрации.

Процесс хлорирования включает в себя множество вариаций как реагентов и доз, так и способов подачи. В зависимости от используемого реагента способ обеззараживания приобретает свои преимущества и недостатки.

Общими для всех реагентов являются следующие преимущества:

- простота технического оформления, небольшие эксплуатационные расходы;
- доступность реагентов, их невысокая стоимость;
- возможность производить некоторые реагенты на месте потребления;
- высокая степень обеззараживания;
- пролонгированное действие.

Недостатки метода:

- в результате хлорирования могут образовываться токсичные хлорорганические соединения;
- растворы хлорсодержащих реагентов коррозионно активны;
- риски, связанные с разливом, взрывом, утечками используемых реагентов, при их транспортировке, хранении и применении;
- резистентность некоторых патогенных организмов к действию хлорсодержащих реагентов.

---

<sup>76</sup> СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания...

### Мембранные методы очистки

К мембранным методам очистки воды относят микро-, ультра- и нано- филь- трование, обратный осмос. На рисунке 49 приведен диапазон использования разных типов мембран в зависимости от размера частиц примесей.

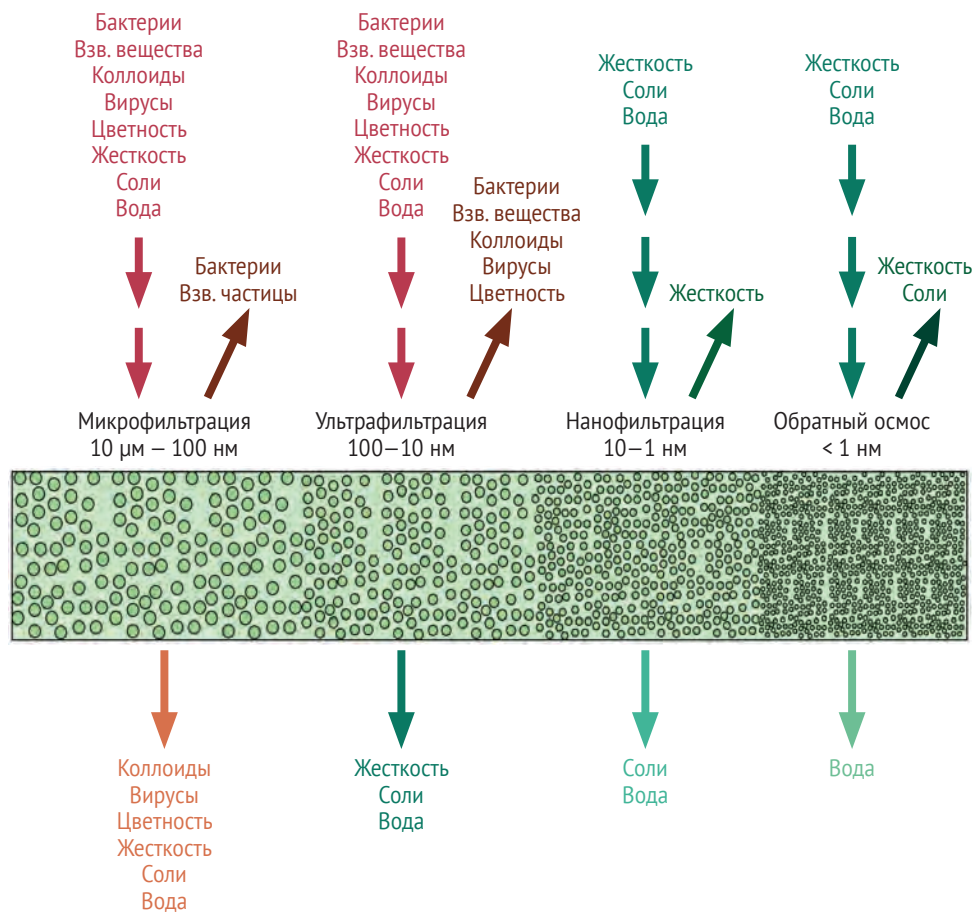


Рис. 49. Представление о возможностях мембранных методов очистки воды

Обратный осмос — один из наиболее перспективных методов обработки воды, преимущества которого заключены в малых энергозатратах, несложных конструкциях аппаратов и установок, малых их габаритах и простоте эксплуатации; применяется для обессоливания воды с содержанием до 40 г/л, причем границы его использования постоянно расширяются.

Фильтрация осуществляется за счет пропуска жидкости через полупроницаемую мембрану, размер ячеек которой составляет менее 0,001 микрона (примерно 0,000001 мм). Принцип работы системы обратного осмоса заключается в прохождении молекул воды через полупроницаемую мембрану под

давлением. Корпус мембраны обратного осмоса состоит из прижатых друг к другу и обернутых вокруг полой центральной трубки листов. Подобная конфигурация обычно называется спиральной или модульной. Помещаются подобные мембраны в специальные контейнеры, называемые корпусами мембран обратного осмоса. Они позволяют поддерживать необходимое давление по всей поверхности. Именно оно является движущей силой, заставляющей жидкость проходить через мембрану, отделяющую нежелательные примеси. Максимально упрощенная схема обратного осмоса изображена на рисунке 50.

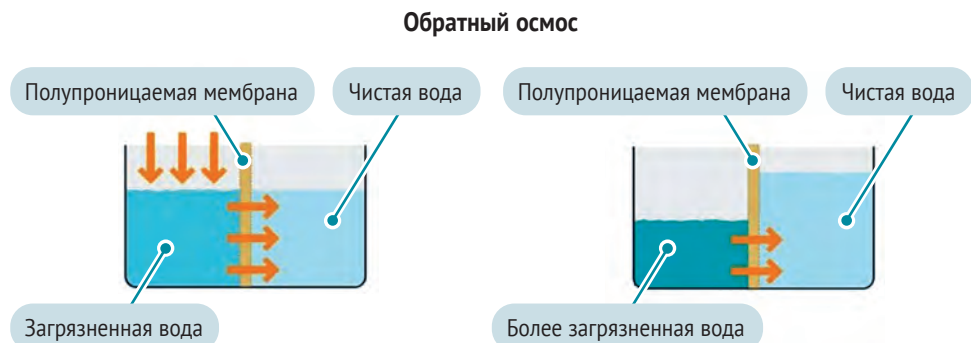


Рис. 50. Принцип обратного осмоса

Ультрафильтрация по схеме ведения процесса и параметрам — промежуточное звено между фильтрованием и обратным осмосом. Технологические возможности ультрафильтрации во многих случаях гораздо шире, чем у обратного осмоса. Так, при обратном осмосе, как правило, происходит общее задержание почти всех частиц. Однако на практике часто возникает задача селективного разделения компонентов раствора, т. е. фракционирования. Решение этой задачи является очень важным, поскольку возможны отделение и концентрирование весьма ценных или редких веществ (белки, физиологически активные вещества, полисахариды, комплексы редких металлов и т. д.).

Ультрафильтрацию (рис. 51) в отличие от обратного осмоса (см. рис. 50) используют для разделения систем, в которых молекулярная масса растворенных компонентов намного больше молекулярной массы растворителя. Например, для водных растворов принимают, что ультрафильтрация применима тогда, когда хотя бы один из компонентов системы имеет молекулярную массу от 500 и более. Движущей силой ультрафильтрации является разность давлений по обе стороны мембраны.

Нанофильтрация — способ водоподготовки, который основан на разделении жидкостей при пропускании жидкости через поверхность мембраны под высоким давлением. При этом поверхность нанофильтрационной мембраны имеет более проницаемый и менее плотный селективный слой по сравнению с мембранами, применяемыми в установках обратного осмоса. На мембранный элемент под давлением подают жидкость. Чистая жидкость поступает в канал пермеата, а загрязненная — остается в канале подачи.

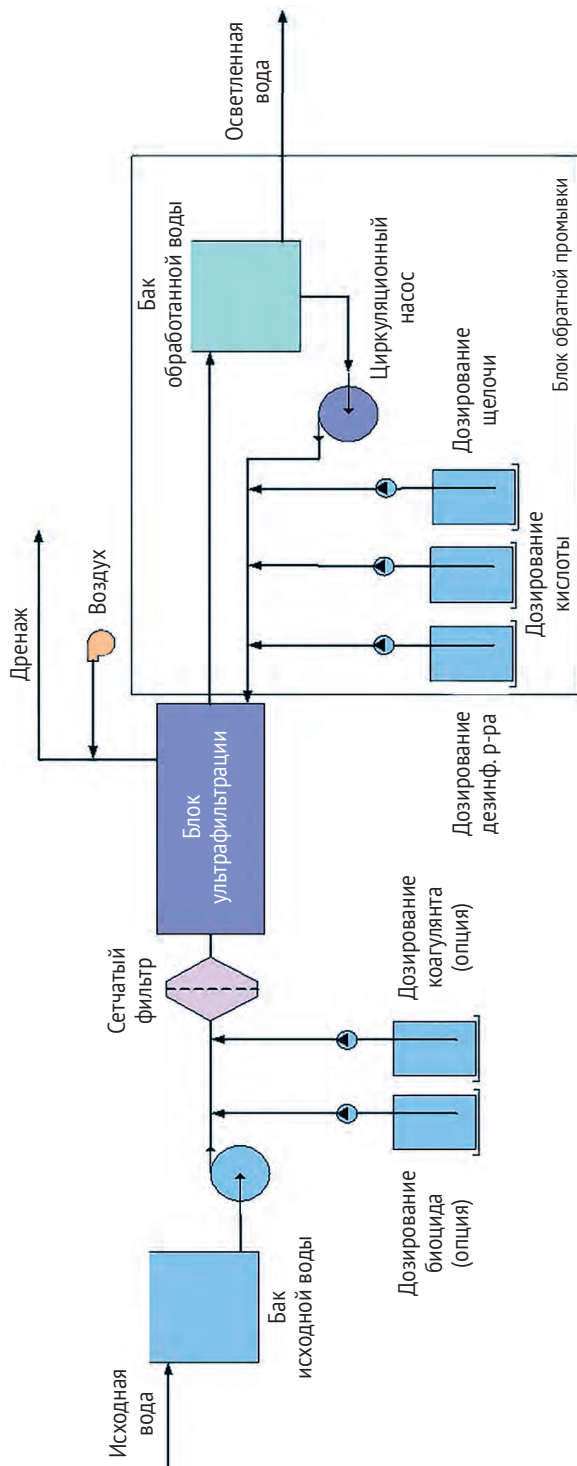


Рис. 51. Принципиальная схема ультрафилтрации

Нанофильтрация водных растворов занимает промежуточное положение между ультрафильтрацией и обратноосмотической очисткой. Размер пор нанофильтрационных мембран составляет от 0,002 до 0,001 мкм, что в 10–50 раз меньше по сравнению с порами в ультрафильтрационных мембранах. Рабочее давление при нанофильтрационной очистке в 2–3 раза выше — в среднем от 3 до 50 бар.

Микрофильтрация — это процесс отделения из фильтруемой среды крупных коллоидных частиц или взвешенных микрочастиц размером 0,02–25,00 мкм. Мембраны для микрофильтрации обычно имеют изотропную структуру. Они обладают высокой производительностью, особенно в начальный период эксплуатации. Микрофильтрацию, как правило, осуществляют при небольших перепадах давления (до 0,2 МПа) на мембране (или мембранном элементе) во избежание значительных деформаций, которым подвержены мембраны (или мембранный элемент) при приложении на них нагрузки извне.

Некоторые данные, относящиеся к перечисленным методам, представлены в таблице 12.

Таблица 12. Компоненты воды, удаляемые методами мембранного фильтрования, включая осмос

Показатель	Метод			
	Микро-фильтрование	Ультра-фильтрование	Нано-фильтрование	Обратный осмос
Размер удерживаемых частиц, мкм	> 0,2	0,10–0,01	0,010–0,001	< 0,001
Компоненты воды	Зоопланктон, водоросли, осадок, бактерии, взвешенные частицы	Макромолекулы, вирусы, коллоиды	Органические соединения, двухвалентные ионы (например, Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> )	Одновалентные ионы (например, Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> )
Требуемая разность давлений, бар	0,2–5,0	1–10	5–10	10–150

### Опреснение

Этот метод, отличающийся большим разнообразием, называемый также деионизацией или деминерализацией, представляет собой уменьшение содержания растворенных в жидкости солей. Обессоливание морской или засоленной воды носит название опреснения. Нормы предусматривают содержание соли

в воде, не превышающее 1 г/л. В отдельных случаях допустима концентрация соли 1,5 г/л. Но во многих регионах концентрация солей в подземных и поверхностных водах превышает эти значения. А в морской воде, запас которой на планете является основным, соли содержится от 10 до 40 г/л. Морская вода нуждается в опреснении (рис. 52). И для разных видов существуют свои методы обессоливания воды.



Рис. 52. Опреснительная установка

Водоочистка воды от солей может быть частичной или полной. Например, приведение жидкости в соответствие с санитарными нормами требует снижения солесодержания до 1000 мг/л, а для питания барабанных и прямоточных котлов на тепловых электростанциях необходимо предельно возможное удаление солей и получение жидкости, по своим свойствам гораздо лучшей, чем вода дистиллированная. Организации по очистке воды выбирают различные способы снижения содержания солей: ионный обмен, обратный осмос, электродеионизацию, дистилляцию и др. Выбор оптимального инженерно-технического решения для водоочистки водоснабжения выполняется после всесторонней оценки объекта и потребностей заказчика.

В таблице 13 приведены сведения о химических веществах, которые присутствуют в среде при водоподготовке.

Таблица 13. Сведения о химических веществах, присутствующих в среде на стадии водоподготовки

Наименование вещества (соединения)	Наименование процесса	Reg. номер CAS	Агрегатное состояние	Формула	ПДК в атмосферном воздухе населенных мест, мг/м <sup>3</sup> / ПДК в воде, мг/дм <sup>3</sup>
Озон	Обеззараживание	10028-15-6	Газ. Аллотропная модификация кислорода	O <sub>3</sub>	ПДК м. р. — 0,16 мг/м <sup>3</sup> ; ПДК с. с. — 0,03 мг/м <sup>3</sup>
Уголь активированный	Обеззараживание (адсорбирующие материалы)	16291-96-6, 7440-44-0	Твердый пористый материал	C	ПДК м. р. — 0,3 мг/м <sup>3</sup>
Хлор (жидкий)	Обеззараживание	7782-50-5	Газ	Cl <sub>2</sub>	ПДК м. р. — 0,1 мг/м <sup>3</sup> ; ПДК с. с. — 0,03 мг/м <sup>3</sup>
Натрия гипохлорит	Обеззараживание	7681-52-9	Неустойчивое кристаллическое соединение	NaOCl	—



ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Краткое описание, основные характеристики
0,1	1	<p>При нормальных условиях — голубой газ с резким специфическим запахом.</p> <p>Мощный окислитель.</p> <p>В умеренных концентрациях не токсичен.</p> <p>В отличие от хлорсодержащих реагентов, озон — нестойкое соединение, быстро разлагающееся в воде, что объясняет его ограниченное применение для заключительного обеззараживания лишь в небольших городах и более широкое использование на промежуточных этапах очистки воды.</p> <p>Минимальная смертельная концентрация (LD<sub>50</sub>) — 4,8 ppm.</p> <p>Порог человеческого обоняния приблизительно равен 0,01 мг/м<sup>3</sup>.</p> <p>Озон эффективно уничтожает плесень, бактерии и вирусы.</p>
10 (угольной пыли)	4, 3 — аэрозоли фиброгенного действия	<p>Уголь активированный, карбопект, сорбекс.</p> <p>Пористый материал, производимый из древесного угля, кокса, из каменного угля или нефти, скорлупы кокосовых орехов и других углеродсодержащих материалов.</p> <p>Активированный уголь удаляет загрязнители из воды методами абсорбции, реже — каталитического окисления.</p>
1	2	<p>Ядовитый, удушающий газ желтовато-зеленого цвета, тяжелее воздуха, с резким запахом.</p> <p>Газообразный хлор относительно легко сжимается.</p> <p>Концентрированный раствор хлора, обеспечивающий полное обеззараживание воды и осуществляющий ее защиту от бактериальных загрязнений. Содержание активного хлора в растворе — 14 %.</p> <p>Хлор, как и гипохлорит натрия, при попадании в воду образует хлорноватистую кислоту, участвующую непосредственно в процессах уничтожения микробиологических загрязнений. Именно этим объясняется схожее обеззараживающее действие двух реагентов.</p>
–	2	<p>Гипохлорит натрия, лабарракова вода, жавелевая вода.</p> <p>Соединение в свободном состоянии очень неустойчиво, обычно используется в виде относительно стабильного пентагидрата или водного раствора, имеющего характерный резкий запах.</p> <p>Соединение можно рассматривать как соль неустойчивой хлорноватистой кислоты.</p> <p>Гипохлорит натрия применяется в виде разбавленного раствора, в питьевой воде образуется меньшее количество побочных продуктов, чем при использовании жидкого хлора.</p> <p>Пероральная токсичность соединения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– мыши, LD<sub>50</sub> — 5800 мг/кг;</li> <li>– человек, TD<sub>L0</sub> — 1000 мг/кг.</li> </ul>

Наименование вещества (соединения)	Наименование процесса	Рег. номер CAS	Агрегатное состояние	Формула	ПДК в атмосферном воздухе населенных мест, мг/м <sup>3</sup> / ПДК в воде, мг/дм <sup>3</sup>
Аммония сульфат	Обеззараживание	7783-20-2	Твердое вещество	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	–
Аммиак	Обеззараживание	7664-41-7	Газ	NH <sub>3</sub>	ПДК м. р. – 0,2 мг/м <sup>3</sup> ; ПДК с. с. – 0,04 мг/м <sup>3</sup>
Алюминия оксихлорид	Коагулянт	12042-91-0 при $a = 2,5$ ; $x = 0,5$	Твердое вещество	Al(OH) <sub>a</sub> Cl <sub>x</sub> при $a + x = 3$ и $a > 1,05$	–
		10284-64-7 при $a = 2$ ; $x = 1$			
		1327-41-9		Al <sub>n</sub> Cl <sub>m</sub> (OH) <sub>3n-m</sub>	
Калия перманганат	Коагулянт	7722-64-7	Твердое вещество	KMnO <sub>4</sub>	–
Натрий	Основные компоненты (обычно с концентрацией > 10 мг/л)	7440-23-5	Твердое вещество	Na <sup>+</sup>	–

Таблица 13 (продолжение)

ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Краткое описание, основные характеристики
10	4	<p>Сульфат аммония, аммоний серноокислый, представляет собой прозрачный (белый) порошок без запаха, растворим в воде и водных растворах аммиака. В воздухе может находиться в форме аэрозоля.</p> <p>Применяется в качестве добавки при хлорировании водопроводной воды.</p> <p>Сульфат аммония признается безопасным для человека и используется в качестве пищевой добавки E517.</p> <p>LD<sub>50</sub> – 2840 мг/кг (крысы; перорально).</p>
20	4	<p>Аммиак – бесцветный газ с резким характерным запахом.</p> <p>Применяется при обеззараживании воды гипохлоритом натрия как добавленный реагент (добавление аммиаксодержащего реагента), который в условиях протяженной распределительной сети обеспечивает длительное действие бактерицидных свойств хлора независимо от наличия в технологической схеме озонирования воды.</p> <p>По физиологическому действию на организм человека аммиак относится к группе веществ удушающего и нейротропного действия.</p> <p>LD<sub>50</sub> – 200–1490 мг/кг.</p>
–	–	<p>Оксихлорид алюминия, гидроксохлорид алюминия, полиалюминия хлорид – наиболее перспективные и экономичные коагулянты нового поколения, которые представляют собой водный раствор основных солей хлорида алюминия.</p>
0,3 (в пересчете на MnO <sub>2</sub> )	2	<p>Калия перманганат, марганцовокислый калий, калиевая соль марганцовой кислоты. Представляет собой темно-фиолетовые, почти черные кристаллы, при растворении в воде образующие ярко окрашенный раствор цвета фуксии.</p> <p>Коагулянт.</p>
–	4	<p>Натрий в свободном состоянии представляет собой легкий, мягкий, химически активный щелочной металл серебристо-белого цвета.</p> <p>Чистый металлический натрий огнеопасен, на воздухе склонен к самовоспламенению, бурно реагирует с водой, часто со взрывом, с образованием щелочного раствора.</p> <p>Форма нахождения в воде – ионная.</p>

Наименование вещества (соединения)	Наименование процесса	Рег. номер CAS	Агрегатное состояние	Формула	ПДК в атмосферном воздухе населенных мест, мг/м <sup>3</sup> / ПДК в воде, мг/дм <sup>3</sup>
Калий	Основные компоненты (обычно с концентрацией > 10 мг/л)	7440-09-7	Твердое вещество	K <sup>+</sup>	20 мг/дм <sup>3</sup> (в питьевой воде)
Магний	Основные компоненты (обычно с концентрацией > 10 мг/л)	7439-95-4	Твердое вещество	Mg <sup>2+</sup>	–
Кальций	Основные компоненты (обычно с концентрацией > 10 мг/л)	7440-70-2	Твердое вещество	Ca <sup>2+</sup>	Ориентировочно допустимый уровень – 20,0 мг/дм <sup>3</sup>
Железо	Дополнительные примеси (обычно в пределах 0,1–10,0 мг/л)	7439-89-6	Твердое вещество	Fe <sup>2+</sup>	0,3 мг/дм <sup>3</sup> (расчетное значение в воде)
Гуминовые вещества	Дополнительные примеси (обычно в пределах 0,1–10,0 мг/л)	1415-93-6 – гуминовая кислота	Твердое, вязкое вещество	NO <sub>4</sub>	–

Таблица 13 (окончание)

ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Краткое описание, основные характеристики
–	4	<p>Калий – серебристый металл с характерным блеском на свежееобразованной поверхности.</p> <p>Химически активен, является сильным восстановителем.</p> <p>На воздухе свежий срез быстро тускнеет из-за образования пленок соединений (оксиды и карбонат). При длительном контакте с атмосферой способен полностью разрушиться.</p> <p>С водой реагирует со взрывом. Форма нахождения в воде – ионная.</p>
–	4	<p>Магний – металл серебристо-белого цвета, при обычных условиях поверхность магния покрыта довольно прочной защитной пленкой оксида магния MgO.</p> <p>Магний высокой чистоты пластичен, хорошо прессуется, прокатывается и поддается обработке резанием. Форма нахождения в воде – ионная.</p>
–	3	<p>Кальций в свободном состоянии – металл серебристо-белого цвета, легко взаимодействует с кислородом, углекислым газом и влагой воздуха, из-за чего поверхность металлического кальция обычно тускло-серая.</p> <p>Кальций относится к числу жизненно важных элементов для организмов. Форма нахождения в воде – ионная.</p>
–	3	<p>Железо в свободном состоянии – серебристо-белого цвета металл с сероватым оттенком.</p> <p>Железо в воде чаще всего присутствует в форме гидроокиси железа. Форма нахождения в воде – ионная.</p> <p>Если содержание железа в воде превышает 0,3 мг/л, то человек воспринимает воду как мутную и окрашенную в желто-коричневый цвет.</p>
–	4	<p>Гуминовые вещества – природные органические соединения, составляющие от 50 до 90 % органического вещества, образуются при разложении растительных и животных остатков под действием микроорганизмов и абиотических факторов среды.</p> <p>Представляют собой макрокомпонент органического вещества почвенных и водных экосистем.</p>

## СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

Природная вода — это очень сложная дисперсная система, содержащая огромное количество минеральных и органических примесей. Качество воды, возможность ее использования для питья и в технических целях оцениваются по целому ряду параметров, на основании которых осуществляется выбор решений по очистке воды. Метод обработки воды выбирают на основе предварительного изучения состава и свойств воды источника, намеченного к использованию, и их сопоставления с требованиями потребителя, т. е. выбор метода водоподготовки основывают на сопоставлении качества воды источника водоснабжения с требованиями или регламентом технологии потребителя.

Источники водоснабжения делятся на поверхностные и подземные. Выбор, получение разрешения на использование источника водоснабжения и обеспечение мероприятий, направленных на сохранение качества источника водоснабжения населенного пункта или предприятия, регулируются санитарным законодательством для поверхностного источника; для подземного источника необходимо выполнять требования законодательной базы по недропользованию. Характеристика и класс водного источника (табл. 14) определяют исходное основание для выбора технологических решений.

По данным, приведенным в таблице 14, в зависимости от класса водного источника при **использовании поверхностного водозабора** возможны следующие методы водоподготовки:

**1-й класс** — фильтрование с реагентной обработкой или без нее, обеззараживание;

**2-й класс** — коагулирование, отстаивание, фильтрование, обеззараживание; при наличии фитопланктона — микрофильтрование;

**3-й класс** — основные методы — то же, что и для 2-го класса, а также дополнительно: вторая ступень осветления, окислительные и сорбционные методы и более эффективные методы обеззараживания.

При использовании **подземных источников водоснабжения**:

**1-й класс** — не требуется обработка;

**2-й класс** — аэрирование, фильтрование, обеззараживание;

**3-й класс** — предусмотренное во 2-м классе, с применением дополнительных — фильтрование с предварительным отстаиванием, использование реагентов и т. д.

Нередко оказывается, что одна и та же проблема решается с помощью различных методов или, наоборот, одни и те же методы могут использоваться для решения разных задач.

Алгоритм выбора эффективных оптимальных технологических решений состоит из следующих позиций:

— техническое обследование и анализ эффективности системы водоснабжения с целью повышения качества очистки воды или безопасности технологического процесса, выявления проблемных зон по технологическим переделам системы водоснабжения, ранжирования отдельных рисков, учитывающих основные причины несоответствия качества питьевой воды гигиеническим требованиям;

- изучение рынка технологического оборудования и практического опыта применения технологий в аналогичных условиях (тип и качество водосисточника, проектная производительность, климатическая зона (особенно актуально для поверхностных источников), гидрогеологические условия, региональные особенности, уровень эксплуатационных затрат, степень автоматизации технологического процесса, уровень квалификации обслуживающего персонала, система транспортировки питьевой воды);
- если нет реализованных аналогов, целесообразно проведение цикла лабораторных и (или) пилотных опытно-промышленных испытаний на конкретных объектах;
- анализ эффективности (в том числе экономической) предлагаемой технологии для конкретных условий водоснабжения.

Таблица 14. Требования к источнику питьевого водоснабжения и соответствующим технологиям водоподготовки

№ п/п	Показатели источника по ГОСТ 2761-84. Источники питьевого водоснабжения	Класс		
		1	2	3
<i>Подземные воды</i>				
1	Мутность, мг/дм <sup>3</sup> (не более)	1,5	1,5	10
2	Цветность, градус (не более)	20	20	50
3	pH, ед.	6,0–9,0	6,0–9,0	6,0–9,0
4	Fe <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	0,3	10	20
5	Mn <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,1	1	2
6	H <sub>2</sub> S, мг/дм <sup>3</sup>	Отсутствие	3	10
7	F <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	1,5–0,7	1,5–0,7	5
8	Перманганатная окисляемость, мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	2	5	15
9	Число бактерий группы кишечных палочек (БГКП) в 1 л	3	100	1000
<i>Поверхностные воды</i>				
1	Мутность, мг/дм <sup>3</sup> (не более)	20	1500	10 000
2	Цветность, градус (не более)	35	120	200
3	Запах, балл	2	3	4
4	pH, ед.	6,5–8,5	6,5–8,5	6,5–8,5
5	Fe <sub>общ.</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	1	3	5
6	Mn <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	0,1	1	2
7	Фитопланктон, мг/дм <sup>3</sup>	1	5	50
8	Фитопланктон, кл/см	1000	10 000	100 000
9	Перманганатная окисляемость, мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	7	15	20
10	Биологическая потребность в кислороде (БПК), мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	3	5	7
11	Число лактоположительных кишечных палочек (ЛПКП) в 1 л	1000	10 000	50 000

Таблица 15. Современные технологические процессы водоподготовки\*

Наименование технологического процесса	Применяемые технологии	
Обеззараживание	Реагентный метод	
	Хлорирование воды	Озонирование воды
Обесцвечивание (удаление органики)	Реагентный метод – коагуляция	
Осветление	Физико-химические методы	
	Контактные осветлители	Седиментация
Обессоливание	Физико-химический метод	Физические методы
	Ионный обмен	Дистилляция
Обезжелезивание	Физико-химические методы	
	Контактно-сорбционная фильтрация на инертной загрузке с предварительным окислением (аэрация кислородом воздуха, применение реагентов – сильных окислителей)	Каталитическое окисление на активных загрузках с активацией фильтрующего слоя хлоросодержащими окислителями
Деманганация	Физико-химические методы	
	Контактно-сорбционная фильтрация на инертной загрузке с предварительным окислением (аэрация кислородом воздуха, применение реагентов – сильных окислителей)	Каталитическое окисление на однокомпонентных активных загрузках с активацией фильтрующего слоя хлорсодержащими окислителями
Умягчение	Физико-химические методы	
	Ионный обмен	Дистилляция
Сорбция	Реагентный метод	
	Применение порошкообразного активированного угля	
Удаление фторидов, бромидов, бария	Физико-химические методы	
	Контактно-сорбционная фильтрация на инертной загрузке с применением коагулянта	Седиментация/флотация с применением коагулянта
Снижение коррозионной активности воды	Реагентная обработка	
	Применение соды в сочетании с хлористым кальцием	Применение подщелачивающего агента по выбору: сода или щелочь

\* В зависимости от специфики загрязняющих веществ может быть предусмотрен дополнительный метод.



Применяемые технологии	
Физический метод	
Ультрафиолетовое обеззараживание	
Флотация	Мембранные технологии
Обратный осмос	
Седиментация/флотация с предварительным окислением (аэрация кислородом воздуха, применение реагентов – сильных окислителей), коагуляцией	Кавитация в сочетании с фильтрацией в одном аппарате
Каталитическое окисление на двухкомпонентных активных загрузках (дополнительно загрузки, корректирующие pH обрабатываемой воды) с активацией фильтрующего слоя хлоросодержащими окислителями	Седиментация/флотация с предварительным окислением (аэрация кислородом воздуха, применение реагентов – сильных окислителей), коагуляцией и подщелачиванием воды
Физико-химические методы	Физический метод
Обратный осмос	Смешение жесткой и мягкой воды
Применение гранулированного активированного угля	
Физические методы	
Мембранные технологии	
Физико-химический метод	
Применение корректирующих pH загрузок на основе кальция	

Для того чтобы сделать выбор между конкурентоспособными методами, необходимо проводить технико-экономическое сравнение вариантов на основании не только стоимостных характеристик, но также с учетом экологических, социальных и других факторов.

Огромное значение при выборе вариантов имеют эксплуатационные затраты, такие как потребление реагентов, типы потребляемых реагентов и химикатов, их стоимость, объемы потребления. В зависимости от местоположения объекта и наличия подъездных путей стоимость поставки реагента может иметь решающее значение.

Важным фактором является энергопотребление оборудования, особенно в современных экономических условиях, когда стоимость электроэнергии зависит от местоположения объекта.

Необходимо отметить, что на сегодняшний день существует достаточно много схем, методов и установок для водоподготовки (табл. 15). Однако использование любых схем или методов водоподготовки требует привязки к каждому конкретному водисточнику, с обязательным определением их технологической надежности и гигиенической эффективности (т. е. соответствия требованиям бесперебойного водоснабжения и требованиям санитарного законодательства в области качества воды).

На основании информации, представленной в таблице 15, становится очевидным, что в зависимости от качества исходной воды производство питьевой воды может быть многоступенчатым (рис. 53), в свою очередь технологическое решение для каждой ступени имеет вариантность.



Рис. 53. Производство питьевой воды

### **Определение понятия «ресурсоэффективность»**

Ресурсоэффективность<sup>77</sup> — результат целенаправленной деятельности по экономии материальных и других ресурсов на стадиях жизненного цикла товара и при ликвидации отходов на всех этапах их технологического цикла. Комплекс организационных, нормативных и технологических мер по ресурсоэффективности призван обеспечить рациональное использование всех видов ресурсов на всех этапах производственных циклов и циклов потребления.

<sup>77</sup> Черникова О. П., Златицкая Ю. А. Ресурсоэффективность металлургического производства // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2022. — Т. 65, № 6. — С. 390–398. — DOI: 10.17073/0368-0797-2022-6-390-398.

Ресурсоэффективность базируется на совершенствовании структуры потребления ресурсов, более глубокой переработке материальных ресурсов, увеличении доли эффективных ресурсоэффективных технологий во всех отраслях.

Большинство исследователей транслирует единство трех компонентов (экономического, социального и экологического), при этом в качестве ключевого метода, способного поддерживать баланс между ними, выступает оценка ресурсоэффективности.

Концепция ресурсоэффективности привлекает в последние десятилетия постоянно возрастающее внимание исследователей, практикующих специалистов, представителей бизнес-сообщества, органов государственной власти, а также широкой общественности. С одной стороны, это обусловлено волатильностью стоимостных показателей ресурсов и стремлением увеличить объемы производства в усложняющихся условиях, а с другой — ужесточающимися нормативными ограничениями техногенных воздействий на окружающую среду и истощающимися запасами критического и дефицитного сырья. В обозначенном контексте ресурсоэффективность (как категория ресурсоэффективной экономики) может рассматриваться в качестве способа согласования экономических интересов с ключевыми целями в области экологии. Современное понимание ресурсоэффективности в проекции на весь жизненный цикл использования ресурсов охватывает все виды экономических мероприятий — от повышения операционной эффективности до сокращения объемов использования сырья, включая внедрение различных инноваций и усилия по преодолению внешних негативных воздействий. Фактически речь идет обо всех подходах и инициативах, направленных на повышение эффективности использования материалов и энергии как с позиций повышения удельной производительности, так и с учетом снижения ресурсоемкости. Международное сообщество прилагает значительные усилия по разработке и внедрению руководящих принципов для повышения эффективности использования ресурсов в реальном секторе экономики. Многочисленные международные инициативы последних лет ориентированы на повышение значимости этих вопросов в политической повестке, подтверждением могут служить: создание Альянса по повышению эффективности использования ресурсов под эгидой Группы семи государств (G7), Дорожная карта «ресурсоэффективной экономики Европы» (The Roadmap to a Resource Efficient Europe, 2011 г.), План действий Европейского союза по развитию экономики замкнутого цикла (2020 г.) и другие мероприятия. Организация Объединенных Наций в 2007 г. учредила Международную группу по ресурсам (International Resource Panel) как специальную комиссию экспертов по этому вопросу, призванную помочь странам рационально использовать природные ресурсы без ущерба для экономического роста и человеческих потребностей. В 2016 г. по запросу лидеров G7 Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) опубликовала «Руководство по политике в области эффективности использования ресурсов», в котором содержатся рекомендации национальным правительствам по реализации соответствующей политики и внедрению нормативно-правовой базы для более рационального использования ресурсов. Глобальные международные инициативы дополняются национальными и региональными усилиями, направленными на формирование

и развитие ресурсоэффективной экономики. Однако, несмотря на все попытки актуализировать повестку ресурсоэффективности на всех уровнях, принимаемые меры по-прежнему не обеспечивают последовательного системного подхода и широкомасштабной реализации, что не позволило до настоящего времени достигнуть поставленных амбициозных целей. Во многом перспективы успешной реализации инициатив в сфере ресурсоэффективности обусловлены подготовкой квалифицированных специалистов, владеющих практическими навыками оценки эффективности использования материальных и энергетических ресурсов (рис. 54).

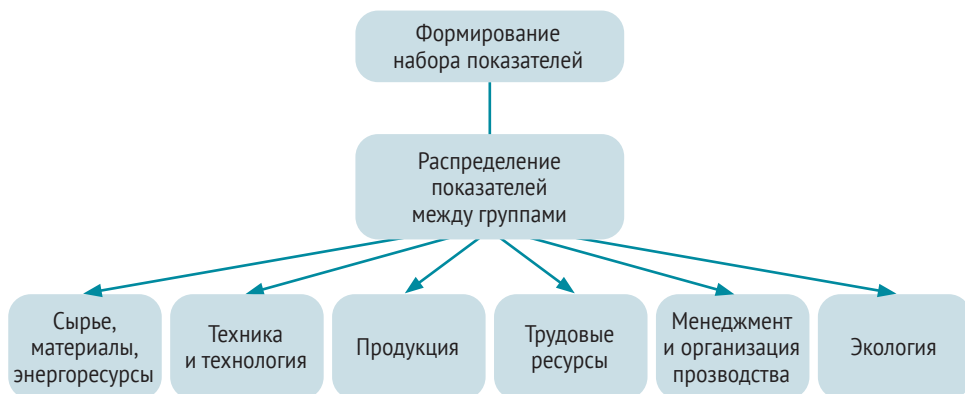


Рис. 54. Построение модели оценки ресурсоэффективности производства питьевой воды

Алгоритм построения модели производства питьевой воды

1. Обязательное условие выбора технологий — гарантированное обеспечение санитарных требований к качеству питьевой воды.
2. Исследования и выявление типа и концентрации загрязняющих веществ в воде водоисточника.
3. Выбор технологических решений для производства питьевой воды нормативного качества с учетом влияния каждого последующего процесса на предыдущий.
4. Оценка и сравнительный анализ затрат ресурсов каждого технологического решения.

Оценка ресурсоэффективности производства питьевой воды (табл. 16):

1) основана на формировании набора необходимых показателей и их распределении между соответствующими группами для обеспечения охвата соответствующих составляющих ресурсоэффективности предприятия водо-подготовки:

- группа 1 — сырье и материалы,
- группа 2 — техника и технология,
- группа 3 — продукция, питьевая вода,
- группа 4 — трудовые ресурсы,
- группа 5 — менеджмент и организация производства,
- группа 6 — экология;

2) осуществляется на рассчитанных значениях показателей групп состояния ресурсоэффективности предприятия (конечная оценка):

- Н — низкий уровень показателя,
- С — средний уровень показателя,
- В — высокий уровень показателя.

Таблица 16. Методика расчета ресурсоэффективности производства питьевой воды

Показатель	Формула расчета	Расшифровка параметров расчета
<b>Ресурсоэффективность производства</b>	$РП = ЭР + СР + Э$	РП — ресурсоэффективность производства, ЭР — ресурсоэффективность экономическая, СР — ресурсоэффективность социальная, Э — ресурсоэффективность экологическая
Ресурсоэффективность экономическая	$ЭР = МР + ТР + ФР + ИР + ВР$	МР — ресурсоэффективность материальная, ТР — ресурсоэффективность трудовая, ФР — ресурсоэффективность финансовая, ИР — ресурсоэффективность информационная, ВР — ресурсоэффективность временная
Ресурсоэффективность материальная	$МР = I_{\text{ФО}} + I_{\text{МО}} + I_{\text{ООС}} + I_{\text{ВГ}} + I_{\text{БФ}} + I_{\text{ЭО}} + I_{\text{ЭЭ}}$	$I_{\text{ФО}}$ — индекс фондоотдачи, $I_{\text{МО}}$ — индекс материалоотдачи, $I_{\text{ООС}}$ — индекс оборачиваемости оборотных средств, $I_{\text{ВГ}}$ — индекс выхода готовой продукции, учитывающий производственные расходы и потери, $I_{\text{БФ}}$ — индекс продукции несоответствующего качества, $I_{\text{ЭО}}$ — индекс эффективности использования оборудования, $I_{\text{ЭЭ}}$ — индекс энергоэффективности
Индекс фондоотдачи	$I_{\text{ФО}} = \frac{\text{ФО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{ФО}_{\text{БАЗ}}}$	$\text{ФО}_{\text{ФАКТ}}$ и $\text{ФО}_{\text{БАЗ}}$ — фондоотдача по факту и в базовый период
Индекс материалоотдачи	$I_{\text{МО}} = \frac{\text{МО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{МО}_{\text{БАЗ}}}$	$\text{МО}_{\text{ФАКТ}}$ и $\text{МО}_{\text{БАЗ}}$ — материалоотдача по факту и в базовом периоде
Индекс оборачиваемости оборотных средств	$I_{\text{ООС}} = \frac{\text{КО}_{\text{ФАКТ}}}{\text{КО}_{\text{БАЗ}}}$	$\text{КО}_{\text{ФАКТ}}$ и $\text{КО}_{\text{БАЗ}}$ — коэффициент оборачиваемости по факту и в базовом периоде

Таблица 16 (продолжение)

Показатель	Формула расчета	Расшифровка параметров расчета
Индекс выхода готовой продукции, учитывающий производственные расходы и потери	$I_{ВГ} = \frac{ВГ_{ФАКТ}}{ВГ_{БАЗ}}$	ВГ <sub>ФАКТ</sub> и ВГ <sub>БАЗ</sub> – выход годной продукции по факту и в базовом периоде
Индекс продукции несоответствующего качества	$I_{БФ} = \frac{БФ_{ФАКТ}}{БФ_{БАЗ}}$	БФ <sub>ФАКТ</sub> и БФ <sub>БАЗ</sub> – количество продукции несоответствующего качества по факту и в базовом периоде
Индекс эффективности использования оборудования	$I_{ЭО} = \frac{ЭО_{ФАКТ}}{ЭО_{БАЗ}}$	ЭО <sub>ФАКТ</sub> и ЭО <sub>БАЗ</sub> – эффективность использования оборудования по факту и в базовом периоде
Индекс энергоэффективности	$I_{ЭЭ} = \frac{ЭЭ_{ФАКТ}}{ЭЭ_{БАЗ}}$	ЭЭ <sub>ФАКТ</sub> и ЭЭ <sub>БАЗ</sub> – энергоотдача по факту и в базовом периоде
<b>Трудовая ресурсоэффективность</b>	$TR = I_{МО} + I_{ЭО}$	TR – трудовая ресурсоэффективность, I <sub>ПР</sub> – индекс производительности труда, I <sub>ЭО</sub> – индекс зарплатоотдачи
Индекс производительности труда	$I_{ПР} = \frac{ПР_{ФАКТ}}{ПР_{БАЗ}}$	ПР <sub>ФАКТ</sub> и ПР <sub>БАЗ</sub> – производительность труда рабочего по факту и в базовом периоде
Индекс зарплатоотдачи	$I_{ЭО} = \frac{ЗО_{ФАКТ}}{ЗО_{БАЗ}}$	ЗО <sub>ФАКТ</sub> и ЗО <sub>БАЗ</sub> – зарплатоотдача по факту и в базовом периоде
<b>Финансовая ресурсоэффективность</b>	$ФР = I_{Р} + I_{РП} + I_{РИ} + I_{ПД}$	ФР – финансовая ресурсоэффективность, I <sub>Р</sub> – индекс рентабельности продукции, I <sub>РП</sub> – индекс рентабельности продаж, I <sub>РИ</sub> – индекс рентабельности инвестиций, I <sub>ПД</sub> – индекс покрытия долга
Индекс рентабельности продукции	$I_{Р} = \frac{Р_{ФАКТ}}{Р_{БАЗ}}$	Р <sub>ФАКТ</sub> и Р <sub>БАЗ</sub> – рентабельность продукции по факту и в базовом периоде
Индекс рентабельности продаж	$I_{РП} = \frac{РП_{ФАКТ}}{РП_{БАЗ}}$	РП <sub>ФАКТ</sub> и РП <sub>БАЗ</sub> – рентабельность продаж по факту и в базовом периоде
Индекс рентабельности инвестиций	$I_{РИ} = \frac{РИ_{ФАКТ}}{РИ_{БАЗ}}$	РИ <sub>ФАКТ</sub> и РИ <sub>БАЗ</sub> – рентабельность инвестиций по факту и в базовом периоде
Индекс покрытия долга	$I_{ПД} = \frac{ПД_{ФАКТ}}{ПД_{БАЗ}}$	ПД <sub>ФАКТ</sub> и ПД <sub>БАЗ</sub> – коэффициент покрытия долга по факту и в базовом периоде

Таблица 16 (продолжение)

Показатель	Формула расчета	Расшифровка параметров расчета
<b>Информационная ресурсоэффективность</b>	$IP = I_{ПЦ} + I_{В} + I_{ОСЗ} + I_{С} + I_{ОСР}$	<p>IP – информационная ресурсоэффективность,  <math>I_{ПЦ}</math> – индекс продолжительности производственного цикла,  <math>I_{В}</math> – индекс дохода от продаж продукции,  <math>I_{ОСЗ}</math> – индекс оборотных средств в запасах,  <math>I_{С}</math> – индекс себестоимости продукции,  <math>I_{ОСР}</math> – индекс оборачиваемости средств в расчетах</p>
Индекс продолжительности производственного цикла	$I_{ПЦ} = \frac{ПЦ_{БАЗ}}{ПЦ_{ФАКТ}}$	$ПЦ_{ФАКТ}$ и $ПЦ_{БАЗ}$ – продолжительность цикла по факту и в базовом периоде
Индекс дохода от продаж продукции	$I_{В} = \frac{В_{ФАКТ}}{В_{БАЗ}}$	$В_{ФАКТ}$ и $В_{БАЗ}$ – доход от продаж продукции по факту и в базовом периоде
Индекс оборотных средств в запасах	$I_{ОСЗ} = \frac{ОСЗ_{БАЗ}}{ОСЗ_{ФАКТ}}$	$ОСЗ_{ФАКТ}$ и $ОСЗ_{БАЗ}$ – оборотные средства в запасах по факту и в базовом периоде
Индекс себестоимости продукции	$I_{С} = \frac{С_{БАЗ}}{С_{ФАКТ}}$	$С_{ФАКТ}$ и $С_{БАЗ}$ – себестоимость продукции по факту и в базовом периоде
Индекс оборачиваемости средств в расчетах	$I_{ОСР} = \frac{ОСР_{БАЗ}}{ОСР_{ФАКТ}}$	$ОСР_{ФАКТ}$ и $ОСР_{БАЗ}$ – оборотные средства в расчетах по факту и в базовом периоде
<b>Временная ресурсоэффективность</b>	$BP = I_{П} + I_{ПО} + I_{ППР}$	<p>BP – временная ресурсоэффективность,  <math>I_{П}</math> – индекс выполнения плана производства,  <math>I_{ПО}</math> – индекс простоев оборудования,  <math>I_{ППР}</math> – индекс выполнения плана продаж</p>
Индекс выполнения плана производства	$I_{П} = \frac{П_{ФАКТ}}{П_{БАЗ}}$	$П_{ФАКТ}$ и $П_{БАЗ}$ – объем производства продукции по факту и в базовом периоде
Индекс простоев оборудования	$I_{ПО} = \frac{ПО_{ФАКТ}}{ПО_{БАЗ}}$	$ПО_{ФАКТ}$ и $ПО_{БАЗ}$ – время простоев оборудования по факту и в базовом периоде
Индекс выполнения плана продаж	$I_{ППР} = \frac{ППР_{ФАКТ}}{ППР_{БАЗ}}$	$ППР_{ФАКТ}$ и $ППР_{БАЗ}$ – объем продаж по факту и в базовом периоде

Таблица 16 (продолжение)

Показатель	Формула расчета	Расшифровка параметров расчета
<b>Социальная ресурсо-эффективность</b>	$CP = I_{TP} + I_{HCC} + I_A + I_{PO} + I_{\text{ш}} + I_{\text{ЗП}} + I_D$	<p><math>I_{TP}</math> – индекс травматизма работников предприятия,  <math>I_{HCC}</math> – индекс несчастных случаев со смертельным исходом,  <math>I_A</math> – индекс аварий на производстве,  <math>I_{PO}</math> – индекс количества нарушителей правил промышленной безопасности, привлеченных к ответственности,  <math>I_{\text{ш}}</math> – индекс сумм штрафов, уплаченных предприятием по результатам проверок соблюдения правил промышленной безопасности,  <math>I_{\text{ЗП}}</math> – индекс размера оплаты труда отрасли к размеру среднерегиональной оплаты труда,  <math>I_D</math> – индекс своевременности выплаты заработной платы работникам</p>
Индекс травматизма работников предприятия	$I_{TP} = \frac{TP_{\text{БАЗ}}}{TP_{\text{ФАКТ}}}$	$TP_{\text{ФАКТ}}$ и $TP_{\text{БАЗ}}$ – травматизм работников по факту и в базовом периоде
Индекс несчастных случаев со смертельным исходом	$I_{HCC} = \frac{HCC_{\text{БАЗ}}}{HCC_{\text{ФАКТ}}}$	$HCC_{\text{ФАКТ}}$ и $HCC_{\text{БАЗ}}$ – число несчастных случаев со смертельным исходом по факту и в базовом периоде
Индекс аварий на производстве	$I_A = \frac{A_{\text{БАЗ}}}{A_{\text{ФАКТ}}}$	$A_{\text{ФАКТ}}$ и $A_{\text{БАЗ}}$ – количество аварий на производстве по факту и в базовом периоде
Индекс количества нарушителей правил промышленной безопасности, привлеченных к ответственности	$I_{PO} = \frac{PO_{\text{БАЗ}}}{PO_{\text{ФАКТ}}}$	$PO_{\text{ФАКТ}}$ и $PO_{\text{БАЗ}}$ – число работников, привлеченных по факту и в базовом периоде
Индекс сумм штрафов, уплаченных предприятием по результатам проверок соблюдения правил промышленной безопасности	$I_{\text{ш}} = \frac{\text{ш}_{\text{БАЗ}}}{\text{ш}_{\text{ФАКТ}}}$	$\text{ш}_{\text{ФАКТ}}$ и $\text{ш}_{\text{БАЗ}}$ – сумма штрафов за нарушение требований промышленной безопасности по факту и в базовом периоде
Индекс размера оплаты труда отрасли к размеру среднерегиональной оплаты труда	$I_{\text{ЗП}} = \frac{\text{ЗП}_{\text{ОТР}}}{\text{ЗП}_{\text{СР.РЕГ}}}$	$\text{ЗП}_{\text{ОТР}}$ – оплата труда рабочего отрасли, $\text{ЗП}_{\text{СР.РЕГ}}$ – средняя региональная оплата труда работника



Таблица 16 (окончание)

Показатель	Формула расчета	Расшифровка параметров расчета
Индекс своевременности выплаты заработной платы работникам	$I_D = \frac{Д_{ФАКТ}}{НЧЗ_{ФАКТ}}$	$Д_{ФАКТ}$ – сумма долгов по заработной плате по факту, $НЧЗ_{ФАКТ}$ – сумма начисленной заработной платы по факту
<b>Экологическая ресурсо-эффективность</b>	$\Xi = I_{ПЖ} + I_3 + I_{НЗ} + I_{ВВ} + I_{СВ} + I_{ФПМ}$	$I_{ПЖ}$ – индекс продолжительности жизни людей в регионе пребывания предприятия, $I_3$ – индекс заболеваемости людей в регионе пребывания предприятия, $I_{НЗ}$ – индекс площади нарушенных земель, $I_{ВВ}$ – индекс выбросов загрязняющих веществ, $I_{СВ}$ – индекс сброса сточных вод, $I_{ФПМ}$ – индекс размера финансирования природоохранных мероприятий
Индекс продолжительности жизни людей в регионе пребывания предприятия	$I_{ПЖ} = \frac{ПЖ_{ФАКТ}}{ПЖ_{БАЗ}}$	$ПЖ_{ФАКТ}$ и $ПЖ_{БАЗ}$ – продолжительность жизни человека по факту и в базовом периоде
Индекс заболеваемости людей в регионе пребывания предприятия	$I_3 = \frac{З_{БАЗ}}{З_{ФАКТ}}$	$З_{ФАКТ}$ и $З_{БАЗ}$ – заболеваемость людей в регионе по факту и в базовом периоде
Индекс площади нарушенных земель	$I_{НЗ} = \frac{НЗ_{БАЗ}}{НЗ_{ФАКТ}}$	$НЗ_{ФАКТ}$ и $НЗ_{БАЗ}$ – площадь нарушенных земель по факту и в базовом периоде
Индекс выбросов загрязняющих веществ	$I_{ВВ} = \frac{ВВ_{БАЗ}}{ВВ_{ФАКТ}}$	$ВВ_{ФАКТ}$ и $ВВ_{БАЗ}$ – объем выбросов загрязняющих веществ по факту и в базовом периоде
Индекс сброса сточных вод	$I_{СВ} = \frac{СВ_{БАЗ}}{СВ_{ФАКТ}}$	$СВ_{ФАКТ}$ и $СВ_{БАЗ}$ – объем сброса сточных вод по факту и в базовом периоде
Индекс размера финансирования природоохранных мероприятий	$I_{ФПМ} = \frac{ФПМ_{ФАКТ}}{ФПМ_{БАЗ}}$	$ФПМ_{ФАКТ}$ и $ФПМ_{БАЗ}$ – сумма финансирования природоохранных мероприятий по факту и в базовом периоде

Перспективным следует считать разработку и внедрение методологии унифицированного подхода к оценке наилучших решений выбора состава технологических решений как на стадии строительства, так и последующей эксплуатации.

Задачу производства питьевой воды нормативного качества при использовании одного и того же водоисточника можно решить по-разному. Например, существующие в Санкт-Петербурге сооружения производства питьевой воды представлены следующими технологическими схемами:

- 1) сооружения одноступенной схемы (контактные осветлители);
- 2) сооружения двухступенной схемы (отстойники и скорые фильтры).

Сравнение технологических решений одноступенной и двухступенной схем всегда не в пользу одноступенной очистки прежде всего в отношении надежности. Особенно остро возникает проблема эффективности работы контактных осветлителей в условиях резкого колебания как качества воды водоисточника (особенно поверхностного), так и гидравлических нагрузок на сооружения при наличии суточной неравномерности водопотребления. Технология, предусматривающая две и более ступеней, более надежная. Однако особое внимание следует уделять как типу сооружений первой ступени, так и конструктиву, техническим характеристикам фильтрующих загрузок, распределительных систем фильтровальных сооружений.

При проектировании сооружений К6 Южной водопроводной станции (ввод в эксплуатацию 2011 г.) экспертно были оценены:

- эффективность работы одноступенной и двухступенной схем действующих сооружений;
- негативное влияние на окружающую среду существующего производства питьевой воды;
- уровень автоматизации производства;
- возможность строительства сооружений, позволяющих максимально реализовывать политику ресурсосбережения.

В современных условиях развития производства недостаточно только сравнивать состав технологических сооружений. Вопрос выбора системы управления параметрами производства питьевой воды приобретает все большую значимость.

В условиях прогрессирующей урбанизации территорий, повышения антропогенного воздействия на окружающую среду, глобального изменения климата, высокой вероятности экологических и техногенных катастроф, истощения природных ресурсов и современной демографической ситуации увеличивается риск снижения уровня безопасности питьевого водоснабжения.

Функционирование централизованных систем водоснабжения приобретает особую значимость, прежде всего, в отношении надежности и безопасности. Таким образом, возникает необходимость поиска новой парадигмы безопасности питьевого водоснабжения как неотъемлемой составляющей национальной безопасности России.

Существующая практика построения системы контроля качества воды, основанная на дискретном отборе проб для лабораторного контроля, с позиций современной парадигмы безопасности водоснабжения, к сожалению, фиксирует события изменения качества воды *post factum* и не соответствует ни возросшим уровням рисков от преднамеренных действий, ни современным техническим возможностям осуществления контроля в режиме онлайн.

Таким образом, одним из приоритетных направлений в области повышения безопасности централизованного водоснабжения можно считать задачу построения мониторинговых систем, способных прогнозировать, своевременно идентифицировать и предотвращать ситуации ухудшения качества обрабатываемой, хранимой и транспортируемой потребителю воды.

Другим важным направлением следует признать разработку прикладных программных продуктов, обеспечивающих эффективное использование большого массива информации, получаемой в результате работы мониторинговых систем. Такие программы на первом этапе должны стать надежными помощниками человека — выдавать рекомендации оперативному персоналу, например, при неблагоприятном прогнозе ухудшения качества водоисточника, или генерировать инструкции по преодолению неблагоприятных ситуаций в случае фиксации опасных событий. Следующим этапом в развитии этого направления должны стать системы искусственного интеллекта, способные принимать решения без участия человека.

Система автоматизированного интеллектуального управления, безусловно, может быть надежной, если производство оснащено современными системами контроля параметров, обеспечивающих объективность, достоверность и своевременность оценки качества воды на всех технологических этапах — от водоисточника до крана потребителя. Поиск передовых разработок, проведение опытно-промышленных испытаний позволили сформировать видение современной мониторинговой системы. Применение измерительно-вычислительных комплексов со специальным ПО (рис. 55) обеспечивает проверку достоверности измерений, диагностику работоспособности анализаторов, надежную и безопасную передачу информации удаленному пользователю с контрольных точек в режиме реального времени.



Рис. 55. Организационная модель регулирования параметров процесса водоподготовки (на примере управления качеством воды) на основе применения методов искусственного интеллекта

### *Энергетическая эффективность водопроводно-канализационного хозяйства*

Процессы водоснабжения и очистки сточных вод относятся к числу наиболее энергоемких в инфраструктуре населенных пунктов (в совокупности уступая только метрополитену в тех городах, где он имеется). Основным потребляемый энергоресурс — электроэнергия.

#### *Задачи и возможности термодинамического анализа*

Вся техника, т. е. совокупность технических объектов, созданных человеком, работает на основе использования энергии. Поэтому естественно, что среди различных подходов к ее изучению, проектированию, эксплуатации и совершенствованию важнейшее место занимает энергетический.

Термодинамический анализ на базе эксергетического метода представляет собой метод энергетического подхода к изучению и разработке технических систем. Независимо от вида технической системы термодинамический анализ проводится на основе уже заранее известных термодинамических параметров системы. Минимальное число этих параметров должно быть таким, чтобы для изучаемой системы и любой ее анализируемой части можно было составить материальный и энергетический балансы. С более общей точки зрения — необходимо располагать данными для балансов, отражающих закон сохранения материи, закон сохранения энергии (в форме первого начала термодинамики) и, наконец, второе начало термодинамики (как сумму двух законов — постоянства энтропии в обратимых процессах и ее возрастания в необратимых). Последний вид баланса — эксергетический — завершает систему уравнений и основан на первых двух балансах.

Метод термодинамического анализа сводится в конечном счете к операциям, производимым в два этапа. На первом этапе путем логической абстракции в зависимости от целей исследования выделяют для анализа любую часть, заключающую элемент или группу элементов рассматриваемой системы, и составляют соответствующие эксергетические балансы. Для анализа нужно знать только необходимые для составления балансов параметры на контрольной поверхности анализируемой части системы; в пределе поверхность может заключать всю систему. На втором этапе для каждой анализируемой части (и, если необходимо, для системы в целом) составляются на основе эксергетических балансов термодинамические характеристики двух видов — абсолютные и относительные. Первые дают эксергию различных видов на входе (расход) и выходе (производительность), а также значения потерь; вторые показывают степень термодинамического совершенства (КПД), относительное значение данной части и ее влияние на другие части и систему в целом. Для нахождения перечисленных характеристик разработан комплекс как аналитических, так и графических приемов, а также алгоритмов расчета, составляющих существенную часть методики анализа.

Проведенный таким путем системный технико-термодинамический анализ позволяет получить разностороннюю и весьма подробную информацию как о самой рассматриваемой технической системе и ее частях, так и о взаимодействиях системы с равновесной средой и находящимися в этой среде другими объектами. Разумеется, в каждом конкретном случае из всего арсенала характеристик вычисляется только тот минимум показателей, которые необходимы для решения задачи.

Задача обычно не сводится только к получению информации о том, что в системе «хорошо» и что «плохо». Эту информацию имеет смысл получать только тогда, когда она используется как «руководство к действию»; для этого существуют две возможности:

- Термодинамическая оптимизация системы. Такая оптимизация может проводиться на разных уровнях, начиная с простого выбора наиболее выгоднейших режимов и параметров работы вплоть до радикального усовершенствования системы с заменой элементов оборудования или даже изменением структуры.
- Технико-экономическая оптимизация системы. Такая оптимизация может проводиться также на разных уровнях. Но во всех случаях она требует привлечения наряду с термодинамической информацией, получаемой в результате эксергетического анализа, определенной технической и экономической информации. Методика их совместного использования определяется видом системы и характером задачи.

#### *Методы и подходы к анализу энергетической эффективности*

Оценка эффективности сложных и распределенных энерготехнологических систем, их энергетической эффективности — процесс системный и многофакторный. Оценка может базироваться только на качественном анализе существующего состояния энергопотребления на предприятии и является объективной при условии организации надлежащего коммерческого, внутрихозяйственного и технического учета энергии и энергоносителей.

В отличие от простых физических или термодинамических процессов с понятными критериями эффективности (КПД) переход к более сложным объектам и системам (включающим в себя экологические и экономические оценки) неизбежно несет в себе наличие неучтенных погрешностей или искажений. При этом разноплановость процессов, происходящих в различных энерготехнологических системах, наличие разнообразных, по существу и формам, резервов повышения энергетической эффективности предопределяют необходимость обобщенного системного подхода, позволяющего выявлять разные типы резервов. В таблице 17 приведены основные существующие методы и подходы к анализу энергетической эффективности промышленных процессов и агрегатов с точки зрения их функциональных возможностей.

Таблица 17. Методы и подходы к анализу энергетической эффективности

Существующие методы и подходы энергетического анализа	Ключевые особенности традиционных методов анализа	Недостатки существующих подходов
Балансовые методы	Показывают общие балансовые потери и соответственно резервы энергосбережения	Неполно учитывают потенциалы энергоносителей и потоков топливно-энергетических ресурсов
Анализ энергоемкости агрегатов (удельных расходов энергоресурсов)	Показывает структуру затрат энергии на выработку продукции	Не учитывает геометрических особенностей рабочих камер энергоустановок
Пинч-анализ	Выявляет «узкие места» энерготехнологических агрегатов и систем	Требует сочетания общеплановых подходов и потенциалов энергопотоков
Эксергетический анализ	Показывает неочевидные при балансовом подходе термодинамические резервы повышения эффективности	Требует расчета эксергии всех участвующих потоков и элементов системы
Сквозной энергетический анализ (метод технологических топливных чисел)	Показывает как энергетические, так и неэнергетические резервы повышения эффективности системы	Требует подробной статистики о прямых и косвенных расходах энергоресурсов на всех стадиях и переделах
Комплексный энергетический анализ	В качестве меры энергоемкости продукта используются кумулятивные затраты энергии/ эксергии на процесс	Требует подробной статистики о прямых и косвенных расходах энергоресурсов на всех стадиях и переделах
Методология интенсивного (предельного) энергосбережения	Показывает максимальные резервы повышения энергетической эффективности всей системы	Требует подробной статистики о прямых и косвенных расходах энергоресурсов на всех стадиях и переделах

### Показатели энергетической эффективности

Показателями энергетической эффективности объектов централизованных систем водоснабжения и водоотведения являются:

а) доля потерь воды в централизованных системах водоснабжения при транспортировке в общем объеме воды, поданной в водопроводную сеть, %;

б) удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе подготовки питьевой воды, на единицу объема воды, отпускаемой в сеть, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

в) удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе транспортировки питьевой воды, на единицу объема транспортируемой воды, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

г) удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе очистки сточных вод, на единицу объема очищаемых сточных вод, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

д) удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе транспортировки сточных вод, на единицу объема транспортируемых сточных вод, кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Фактические значения показателей энергетической эффективности определяются следующим образом:

- доля потерь воды в централизованных системах водоснабжения при ее транспортировке в общем объеме воды, поданной в водопроводную сеть, %:

$$D_{ПВ} = \frac{V_{пот}}{V_{общ.}} \cdot 100 \%,$$

где  $V_{пот}$  — общий объем воды, поданной в водопроводную сеть;  $V_{общ.}$  — объем потерь воды в централизованных системах водоснабжения при ее транспортировке;

- удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе подготовки питьевой воды, на единицу объема воды, отпускаемой в сеть, кВт·ч/м<sup>3</sup>:

$$Y_{РП} = \frac{K_э}{V_{общ.}},$$

где  $K_э$  — общее количество электрической энергии, потребляемой в соответствующем технологическом процессе;  $V_{общ.}$  — общий объем питьевой воды, в отношении которой осуществляется водоподготовка;

- удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе транспортировки питьевой воды, на единицу объема транспортируемой питьевой воды, кВт·ч/м<sup>3</sup>:

$$Y_{РП} = \frac{K_э}{V_{общ.}},$$

где  $V_{общ.}$  — общий объем транспортируемой питьевой воды;

- удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе очистки сточных вод:

$$Y_{рост} = \frac{K_э}{V_{общ.}},$$

где  $V_{общ.}$  — общий объем сточных вод, подвергающихся очистке;

- удельный расход электрической энергии, потребляемой в технологическом процессе транспортировки сточных вод, на единицу объема транспортируемых сточных вод, кВт·ч/м<sup>3</sup>:

$$Y_{РП} = \frac{K_э}{V_{общ. тр. осв}},$$

где  $V_{общ. тр. осв}$  — общий объем транспортируемых сточных вод.

#### *Общая характеристика энергоемкости объектов*

Наиболее энергоемкими объектами организаций водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) являются насосные и воздуходувные установки. Так, на насосные системы приходится около 20% мирового потребления электроэнергии.

По некоторым оценкам, на перекачку сточных вод в России ежегодно расходуется 60–70 млрд кВт·ч электроэнергии. Данные об удельном расходе электрической энергии на перекачку воды и сточных вод приведены в таблице 18.

Таблица 18. Удельный расход электрической энергии на перекачку воды и сточных вод

Полный напор, м	Удельный расход электрической энергии, кВт·ч/1000 м <sup>3</sup>	
	Насосные станции водоснабжения	Насосные станции водоотведения
10	39	44
20	76	83
30	113	124
40	150	167
50	187	211
60	224	257
70	260	304
80	297	353
90	334	404
100	370	-
120	444	-
140	516	-
160	589	-
180	662	-
200	734	-
300	1094	-

Энергетическая эффективность насосных и воздуходувных установок определяется не только состоянием их оборудования, в значительной мере она зависит от структуры, состояния и режимов работы смежных технологических сооружений: систем водоснабжения, водоотведения, канализационных очистных сооружений. Основная доля энергетических затрат предприятий приходится на технологические нужды. С увеличением производительности, например, насосных станций возрастает доля энергии, расходуемой на перекачку стоков, т. е. на основные технологические нужды (табл. 19).

Таблица 19. Распределение энергетических затрат насосных станций в процентах от общего энергопотребления

Энергетические затраты, %	Производительность насосных станций, млн м <sup>3</sup> /год			
	До 50	50–100	100–150	150–200
Перекачка	50–85	85–94	94–95	95–96
Отопление	25–6	6–3	3–2	2–1
Вспомогательные механизмы и системы	8–5	5–3	3–2	2–1
Вентиляция	6–3	3–2	2,0–1,5	1,5–1,0
Освещение	5–3	3–2	2,0–1,5	1,5–1,0
Оперативные цели, релейная защита	1,0–0,5	0,5–0,3	0,3–0,2	0,2–0,1



## Инвентаризация и оценка насосных систем

Первый шаг на пути к определению реалистичных мер по повышению энергоэффективности насосной системы и ее оптимизации — инвентаризация насосной системы предприятия с выявлением основных эксплуатационных характеристик.

Диаграмма (рис. 56) показывает, как со временем снижаются коэффициент полезного действия (КПД) и подача и, соответственно, растут продолжительность работы и энергопотребление насоса.

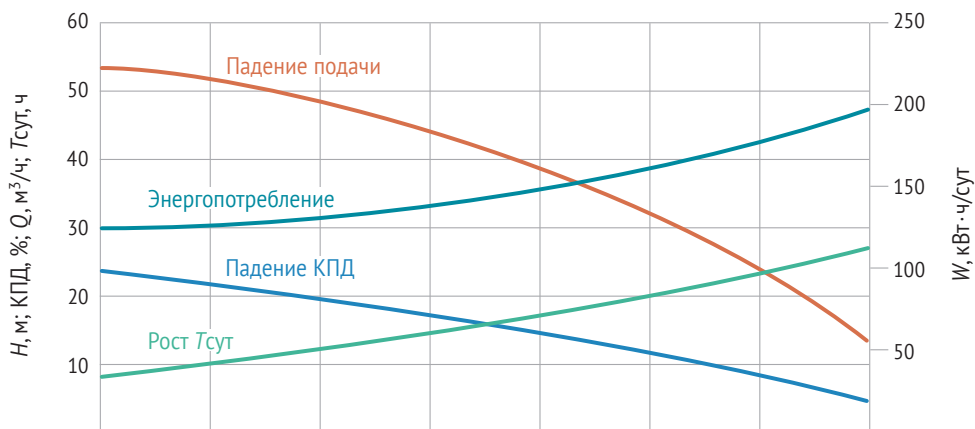


Рис. 56. Изменение параметров насоса в процессе эксплуатации на канализационно-насосной станции

Для получения энергоэффективной насосной системы выбор насоса должен быть произведен таким образом, чтобы рабочая точка находилась как можно ближе к значению расхода, при котором достигается наивысший КПД, как показано на рисунке 57.

Согласно оценкам, 75 % существующих насосных систем объектов ВКХ характеризуются чрезмерной мощностью, причем у многих систем избыток мощности превышает 20 %. Это связано, в том числе, и со снижением объемов потребления по сравнению с проектной мощностью сооружений. Избыточная мощность насосов представляет собой наиболее значительный фактор непроизводительных затрат энергии в насосных системах.

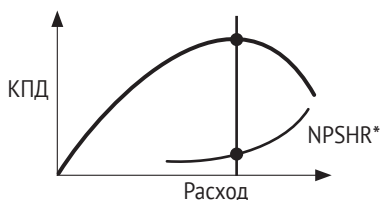


Рис. 57. Зависимость напора, мощности и КПД от расхода и точка максимального КПД (NPSHR — допускаемый кавитационный запас)

При выявлении насосов с избыточной мощностью целесообразно рассмотреть возможность их замены наряду с другими методами уменьшения мощности, которые могут включать в себя замену или подрезку рабочего колеса и/или регулирование скорости привода. Уменьшение размера рабочего колеса является наименее затратным методом снижения чрезмерной мощности насоса. Обработка (подрезка) или замена рабочего колеса в пределах, допускаемых производителем для данного размера корпуса насоса, позволяет снизить напор на 10–50 %.

Применяются следующие методы управления работой насосной системы:

- отключение насосов, необходимость в работе которых отсутствует; несмотря на очевидность этой меры, ее часто упускают из виду в ситуации, когда потребности производства в воде или другой нагнетаемой жидкости значительно сокращаются (это иллюстрирует важность анализа системы в целом);
- применение приводов с переменной скоростью (электродвигателей, оборудованных преобразователями частоты) способствует достижению максимальной эффективности системы, позволяя гибко регулировать производительность в зависимости от меняющихся потребностей;
- использование нескольких насосов как альтернатива методам управления при помощи приводов с переменной скоростью, перепуска или дросселирования; энергосбережение при этом достигается за счет того, что в условиях низких нагрузок часть насосов останавливается, в то время как остальные насосы функционируют в режиме, обеспечивающем высокий КПД.

#### *Резервы роста энергоэффективности за счет снижения потерь воды*

Энергетическая эффективность системы водоснабжения напрямую зависит от величины потерь воды. Только в жилищном фонде потери воды составляют в среднем по стране 18–27 % общего водопотребления, а в отдельных городах достигают 40 %. В наиболее эффективно управляемых системах водоснабжения стран Европы и Северной Америки размер потерь воды оценивается на уровне 4–6 %, среднее значение по развитым странам находится в пределах 15 %.

Объемы потерь воды в системах водоснабжения существенно различаются в зависимости от уровня оснащённости систем приборами учета расходования воды, а также от материала трубопроводов и срока их эксплуатации, наличия современной аппаратуры для диагностики состояния трубопроводов и др. Высокий уровень потерь воды в коммунальных системах водоснабжения большинства российских городов объясняется следующими факторами:

- износ сети;
- использование стальных труб, не защищенных от коррозии;
- повышенные напоры;
- большая амплитуда их колебания в течение суток;
- гидравлические удары;
- недостаточный объем резервуаров;
- недостаток средств управления потоками;

- неудовлетворительная обеспеченность ресурсами на ремонтно-эксплуатационные нужды;
- отсутствие надежных приборов для своевременного обнаружения утечек воды.

Реальные потери воды (иногда их называют физическими потерями) — это ежегодный объем воды, теряемой через все виды утечек (видимые и скрытые) из-за повреждений и аварий трубопроводов питьевой воды (до домового прибора учета воды абонента) и арматуры, а также утечек в резервуарах чистой воды. Реальные потери не могут быть устранены полностью. Разница между неизбежными годовыми реальными потерями и текущими годовыми реальными потерями представляет собой потенциально устранимые реальные потери.

Согласно терминологии, принятой Международной водной ассоциацией (IWA), соотношение между текущими годовыми реальными потерями и неизбежными годовыми реальными потерями представляет собой показатель потерь инфраструктуры (ILI). Он определяет, насколько эффективно в рамках существующей инфраструктуры при текущем рабочем давлении выполняются следующие действия:

- управление давлением, оптимизация работы системы транспорта воды;
- ремонт (его скорость и качество), интенсификация аварийно-восстановительных и планово-профилактических работ;
- активный поиск и контроль утечек;
- управление инфраструктурой — модернизация и реконструкция сети.

Для каждого из четырех действий существует некоторый экономический уровень инвестиций, который рассчитывается или оценивается и зависит от предельной суммы, выделяемой для устранения реальных потерь.

Международный опыт показывает, что значения ILI, близкие к 1,0, соответствуют почти безукоризненному техническому управлению реальными потерями воды при текущем рабочем давлении.

#### *Методология оценки удельного расхода электроэнергии по технологическим переделам*

Процесс водоснабжения можно разделить на два основных подпроцесса:

- производство питьевой воды;
- транспортировка питьевой воды потребителю.

Затраты на производство и транспортировку разбивают по технологическим переделам:

- 1-й технологический передел — забор воды и подача на очистные сооружения;
- 2-й технологический передел — очистка воды на сооружениях водоподготовки;
- 3-й технологический передел — подача питьевой воды в распределительную сеть и транспортировка воды.

Каждый технологический передел характеризуется своими затратами электроэнергии. Удельная норма расхода электроэнергии равна затраченной

электроэнергии на 1 м<sup>3</sup> воды. Таким образом, чем ниже значение показателя, тем выше энергоэффективность процессов на каждом технологическом переделе.

### **Согласование (сведение) данных массового баланса**

В отрасли существует развитая система получения данных о расходах тех или иных сред, которые потребляются или производятся на предприятиях. При этом остро стоит вопрос о правильности тех или иных измерений расходов. Одним из методов оценки правильности измерений является метод согласования данных, основанный на уравнениях массового баланса.

Как правило, проверку массового баланса производят, используя мгновенные значения потоков для установившегося режима работы системы, а не для переходных процессов, когда значения потоков значительно меняются во времени. Также можно производить расчет массового баланса исходя из суммы потоков за какой-то интервал времени. Масса входящих потоков в систему плюс масса исходящих потоков вещества за какое-то время должна быть примерно равна массе веществ, находящихся в системе.

Уравнение массового баланса можно охарактеризовать так:

$$\text{Входящие потоки} - \text{Выходящие потоки} - \text{Разница накопления} = 0$$

или записать как

$$\sum_{j=1}^N a_{ij} F_j = 0,$$

где  $i$  — номер узла (от 1 до  $M$ );

$j$  — номер потока (от 1 до  $N$ );

$a_{ij}$  — коэффициент наличия и направления потока  $F_j$  в узле  $i$ .

Если  $a_{ij} = 0$ , значит, данный поток или компонент не присутствует в данном узле, если +1, то поток входящий, если -1, то поток исходящий.

### **Компонентный баланс**

Производство питьевой воды предусматривает сочетание физико-химических процессов. Таким образом, составление уравнений массового баланса усложняется, так как в процессе производства входящие вещества подвергаются химическим реакциям и в конечном продукте содержатся в каких-то долях. Кроме этого, сбросы или отходы производства не всегда измеряются в связи со сложностью измерений или неустойчивым химическим составом (что не позволяет точно измерить расход), или технологической нецелесообразностью. Поэтому составить уравнения массового баланса из измеренных потоков не всегда возможно. Для этого необходимо рассмотреть состав вещества как во входящих, так и в исходящих потоках и составить уравнения исходя из их компонентов. При этом уравнения можно составить таким образом, чтобы проигнорировать неизмеряемые потоки.

### Уравнения баланса для химических реакций

На стадиях водоподготовки, где предусмотрено применение химических реагентов, происходит химическая реакция, при этом одни химические элементы превращаются в другие. А это значит, что в исходящих потоках одних компонентов будет больше, а других меньше по сравнению с входящими потоками. При этом уравнение баланса по компонентам будет неверным, и надо вводить в уравнение баланса члены, связанные с особенностями реакции.

В процессе химической реакции масса вещества химического элемента уменьшается, если он выступает в реакцию в качестве реагента. Масса продукта увеличивается. Инертные вещества массу не меняют. Как правило, вступает в реакцию не все вещество, а только его часть (активное вещество, например, в коагулянте сернокислом алюминии  $Al_2O_3$ ), причем точно неизвестно, какая часть. Учитывая это, можно записать для компонента  $k$ , который принимает участие в реакции  $r$ :

$$F_{вхk,r} + M_{реаk,r} - F_{исхk,r} = 0,$$

где  $F_{вхk,r}$  — масса входящего вещества компонента  $k$ ;

$M_{реаk,r}$  — масса вещества компонента  $k$ , вступившего в реакцию (отрицательная, если реагент);

$F_{исхk,r}$  — масса вещества, исходящего из реакции.

В общем случае для нескольких реакций  $R$  можно записать уравнения баланса:

$$F_i C_{ik} + \sum_{j=1}^R V_{kj} \xi_j - F_o C_{ok} = 0,$$

$$\sum_{k=1}^{K_{вход}} (F_i C_{ik} - F_o C_{ok}) - \sum_{k=1}^{K_{выход}} (F_i C_{ik} - F_o C_{ok}) = 0,$$

где  $K_{вход}$  — число входных компонентов до реакции;

$K_{выход}$  — число выходных компонентов после реакции.

Для понимания итоговой ресурсоэффективности процесса(-ов) и вычисления истинных значений потоков (с учетом допустимой погрешности) проводится сведение материальных балансов; в англоязычной литературе термин *data reconciliation* переводится как «согласование данных» и используется для математического обозначения термина «сведение массового (материального) баланса».

Подобные задачи решаются методами нелинейного программирования и достаточно сложны для реализации, но при этом имеется несколько математических пакетов, которые решают данную задачу (платные пакеты MathCad, MatLab или бесплатный пакет GAMS).

В качестве примера приведены схема материального баланса производства питьевой воды на сооружениях К6 Южной водопроводной станции ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» (рис. 58) и баланс масс по ряду показателей (табл. 20–25), в том числе потреблению электроэнергии (табл. 26) при осуществлении различных процессов.

Эксергия технологического процесса производства питьевой воды приведена на рис. 59 (данные представлены в табл. 27).

Таблица 20. Баланс массы технической воды для приготовления химических веществ

Сульфат алюминия для коагуляции воды $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$				
Эксплуатационный режим для номинальной мощности станции ( $15,417 \text{ м}^3/\text{ч}$ )	Максимальная дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования	Средняя дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования	Максимальное потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования	Среднее потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования
<p><b>Операционное время:</b> 24 ч/сут, 365 сут/год</p> <p><b>Примечания:</b> а) Для максимальной мощности станции (<math>19,271 \text{ м}^3/\text{ч}</math>), все показатели на 25 % выше. б) Приготовление 20%-ного раствора в подготовительном резервуаре — реагентное хозяйство. в) Разбавление до 5%-ного раствора в трубе перед гидравлическим прыжком.</p>	<p><b>Дозировка:</b> <math>80 \text{ г}/\text{м}^3</math> (<math>12 \text{ г}/\text{м}^3</math> как <math>Al_2O_3</math>).</p> <p><b>Потребление:</b> <math>1,252,6 \text{ кг}/\text{ч}</math> (<math>184,9 \text{ кг}/\text{ч}</math> как <math>Al_2O_3</math>); <math>2,07 \text{ м}^3/\text{ч}</math> 7%-ный водный раствор квасцов <math>Al_2O_3</math>.</p>	<p><b>Дозировка:</b> <math>30 \text{ г}/\text{м}^3</math> (<math>4,6 \text{ г}/\text{м}^3</math> как <math>Al_2O_3</math>).</p> <p><b>Потребление:</b> <math>462,2 \text{ кг}/\text{ч}</math> (<math>71 \text{ кг}/\text{ч}</math> как <math>Al_2O_3</math>); <math>4049 \text{ т}/\text{год}</math> (<math>622 \text{ т}/\text{год}</math> как <math>Al_2O_3</math>); <math>0,78 \text{ м}^3/\text{ч} = 6833 \text{ м}^3/\text{год}</math> 7%-ного водного раствора квасцов как <math>Al_2O_3</math>.</p>	<p><b>Потребление технической воды:</b> для приготовления 20%-ного раствора <math>84,8 \text{ м}^3/\text{сут}</math> (приготовление одной порции, максимум 4 раза в день, прим. <math>22 \text{ м}^3</math> добавляется за <math>0,5 - 1,0 \text{ ч}</math>).</p> <p><b>Потребление 5%-ного раствора:</b> <math>24,675 \text{ м}^3/\text{ч} = 6,85 \text{ л}/\text{с} = 592 \text{ м}^3/\text{сут}</math>.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 5%-ного раствора <math>19,07 \text{ м}^3/\text{ч} = 5,3 \text{ л}/\text{с} = 458 \text{ м}^3/\text{сут}</math>.</p> <p><b>ОБЩЕЕ количество технической воды:</b> <math>542,8 \text{ м}^3/\text{сут}</math>.</p>	<p><b>Потребление технической воды:</b> для приготовления 20%-ного раствора <math>31,8 \text{ м}^3/\text{сут}</math> (приготовление одной порции).</p> <p><b>Потребление 5%-ного раствора:</b> <math>9,253 \text{ м}^3/\text{ч} = 222 \text{ м}^3/\text{сут}</math>.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 5%-ного <math>7,2 \text{ м}^3/\text{ч} = 172,8 \text{ м}^3/\text{сут}</math>.</p> <p><b>ОБЩЕЕ количество технической воды:</b> <math>204,6 \text{ м}^3/\text{сут}</math>.</p>

Полиэлектролит для флокуляции воды и воды для обратной промывки				
<p>Эксплуатационный режим для номинальной мощности станции (15,417 м<sup>3</sup>/ч)</p>	<p>Максимальная дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования</p>	<p>Средняя дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования</p>	<p>Максимальное потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования</p>	<p>Среднее потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования</p>
<p><b>Очистка воды:</b> Операционное время: 24 ч/сут, 365 сут/год.</p> <p><b>Примечание:</b> а) Для максимальной мощности станции (19,271 м<sup>3</sup>/ч), все показатели на 25 % выше. б) Приготовление 0,2%-ного раствора в реактентном хозяйстве. в) Разбавление до 0,05%-ного раствора в трубе перед флокуляционной камерой.</p>	<p><b>Дозировка:</b> 1 г/м<sup>3</sup>.</p> <p><b>Потребление:</b> 15,42 кг/ч.</p>	<p><b>Дозировка:</b> 0,3 г/м<sup>3</sup>.</p> <p><b>Потребление:</b> 4,62 кг/ч.</p>	<p><b>Потребление технической воды:</b> для приготовления 0,2%-ного раствора 8,1 м<sup>3</sup>/ч = 2,25 л/с.</p> <p><b>Потребление 0,05%-ного раствора:</b> 30,8 м<sup>3</sup>/ч = 8,55 л/с.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,05%-ного раствора 23,1 м<sup>3</sup>/ч = 6,4 л/с.</p>	<p><b>Потребление технической воды:</b> для приготовления 0,2%-ного раствора 2,34 м<sup>3</sup>/ч = 58 м<sup>3</sup>/сут.</p> <p><b>Потребление 0,05%-ного раствора:</b> 9,25 м<sup>3</sup>/ч = 222 м<sup>3</sup>/сут.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,05%-ного раствора 6,9 м<sup>3</sup>/ч = 165,6 м<sup>3</sup>/сут.</p>
<p><b>Обработка промывной воды:</b> — расход 800 м<sup>3</sup>/ч; — время действия: до 24 ч/сут, 365 день/год.</p> <p><b>Разбавление до 0,05%-ного раствора:</b> в трубе перед камерой отработанной промывной воды (реактентное хозяйство).</p>	<p><b>Дозировка:</b> 1 г/м<sup>3</sup>.</p> <p><b>Потребление:</b> 0,8 кг/ч.</p>	<p><b>Дозировка:</b> 0,3 г/м<sup>3</sup>.</p> <p><b>Потребление:</b> 0,24 кг/ч.</p>	<p><b>Потребление 0,05%-ного раствора:</b> 1,6 м<sup>3</sup>/ч = 0,44 л/с.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,05%-ного раствора 1,2 м<sup>3</sup>/ч = 0,33 л/с.</p>	<p><b>Потребление 0,05%-ного раствора:</b> 0,48 м<sup>3</sup>/ч = 11,52 м<sup>3</sup>/сут.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,05%-ного раствора 0,36 м<sup>3</sup>/ч = 8,64 м<sup>3</sup>/сут.</p>

Таблица 20 (окончание)

Полиэлектролит для кондиционирования осадка				
	Максимальная дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования	Средняя дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования	Максимальное потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования	Среднее потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования
<p>Эксплуатационный режим для номинальной мощности станции (15,417 м<sup>3</sup>/ч)</p> <p><b>Функционирование:</b> 6 циклов в день, продолжительность цикла 3 ч.</p> <p><b>Максимальное количество осадка:</b> 2 · 100 = 200 м<sup>3</sup>/ч.</p> <p><b>2 насоса в работе,</b> каждый 100 м<sup>3</sup>/ч (прибл. 1 ч за каждый цикл).</p> <p><b>Время дозирования:</b> прибл. 6 ч в день, 260 дней в году.</p> <p><b>Техническая вода:</b> блок обработки осадка – 0,5%-ный раствор дозируется в блок предварительной подготовки, разбавление до 0,05%-ного раствора в трубе перед наполнением фильтров.</p>	<p><b>Дозировка:</b> 200 г/м<sup>3</sup>.</p> <p><b>Потребление:</b> 2 · 20 кг/ч.</p>	<p><b>Дозировка:</b> 100 г/м<sup>3</sup>.</p> <p><b>Потребление:</b> 2 · 10 кг/ч.</p>	<p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,5 %-ного раствора 8 м<sup>3</sup>/ч = 2,22 л/с.</p> <p><b>Потребление 0,05%-ного раствора:</b> 80 м<sup>3</sup>/ч = 22 л/с.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,05%-ного раствора 72 м<sup>3</sup>/ч = 20 л/с.</p>	<p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления 0,5%-ного раствора 48 м<sup>3</sup>/ч.</p> <p><b>Потребление 0,05%-ного раствора:</b> 40 м<sup>3</sup>/ч = 480 м<sup>3</sup>/сут.</p> <p><b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 0,05%-ного раствора 36 м<sup>3</sup>/ч = 432 м<sup>3</sup>/сут.</p>



Водный раствор аммиака для обеззараживания воды				
Эксплуатационный режим	Максимальная дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования	Средняя дозировка и потребление при номинальной производительности очистного оборудования	Максимальное потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования	Среднее потребление раствора и технической воды при номинальной производительности очистного оборудования
<b>Операционное время:</b> 24 ч/сут, 365 день/год.	<b>Дозировка:</b> 0,8 г/м <sup>3</sup> .	<b>Дозировка:</b> 0,5 г/м <sup>3</sup> .	<b>Потребление</b> 25%-ного раствора: 67 л/ч = 0,019 л/с.	<b>Потребление</b> 25%-ного раствора: 34,1 л/ч = 0,82 м <sup>3</sup> /день.
<b>Техническая вода:</b> дозировуется в трубу перед впрыскиванием в Ду 1200 в блоке фильтрации.	<b>Потребление:</b> 15,4 кг/ч.	<b>Потребление:</b> 7,7 кг/ч.	<b>Потребление</b> 1%-ного раствора: 1,675 м <sup>3</sup> /ч = 0,465 л/с.	<b>Потребление</b> 1%-ного раствора: 0,85 м <sup>3</sup> /ч = 20,4 м <sup>3</sup> /день.
			<b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 1%-ного раствора 1,608 м <sup>3</sup> /ч = 0,45 л/с.	<b>Потребление технической воды:</b> для разбавления до 1%-ного раствора 0,82 м <sup>3</sup> /ч = 19,68 м <sup>3</sup> /день.
Гипохлорит натрия для обеззараживания воды				
<b>Номинальная мощность станции:</b> 15,417 м <sup>3</sup> /ч.	<b>Дозировка:</b> 2,5 г/м <sup>3</sup> .	<b>Дозировка:</b> 1,6 г/м <sup>3</sup> .	<b>Потребление</b> 0,8%-ного раствора: 6,02 м <sup>3</sup> /ч = 1,67 л/с.	<b>Потребление</b> 0,8%-ного раствора: 3,08 м <sup>3</sup> /ч = 73,92 м <sup>3</sup> /день.
<b>Операционное время:</b> 24 ч/сут, 365 день/год.	<b>Потребление:</b> 48,15 кг/ч.	<b>Потребление:</b> 24,65 кг/ч.		

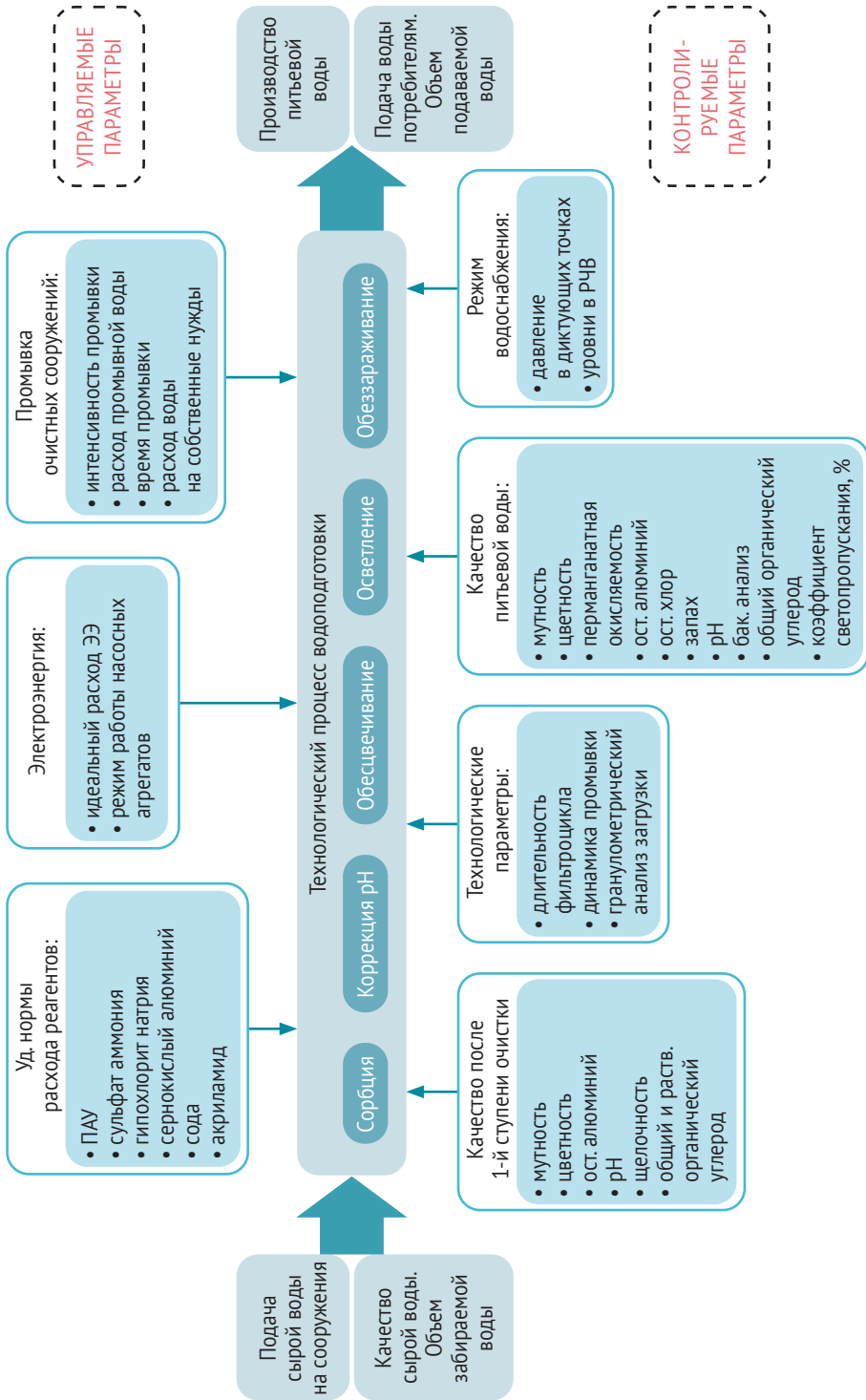


Рис. 58. Материальный баланс производственных процессов (ПАУ — полиароматические углеводороды, ЭЭ — электроэнергия, РЧВ — резервуар чистой воды)

Таблица 21. Баланс массы охлаждающей воды

Использование охлаждающей воды	Максимальное потребление озона	Номинальное потребление озона	Максимальное потребление охлаждающей воды	Номинальное потребление охлаждающей воды	Потребление охлаждающей воды
Охлаждение генераторов озона, $p = 2,5$ бар, 24 ч/день, 365 дней/год	42 кг $O_3$ /ч	28 кг $O_3$ /ч	150 м <sup>3</sup> /ч, 3 насоса в процессе работы	100 м <sup>3</sup> /ч, 2400 м <sup>3</sup> /день, 2 насоса в работе	876 000 м <sup>3</sup> /год

Таблица 22. Баланс массы движущей воды для гидравлической транспортировки гранулированного активированного угля

Тип транспортировки и режим работы	Поток всасывания: уголь + промывная вода	Поток движущей воды	Разгрузочный поток	Продолжительность транспортировки	Общая потребность в движущей и промывной воде
Транспортировка отработанного угля, максимум один раз в месяц	15 + 4 м <sup>3</sup> /ч, $P_{абс} = 1$ бар	40 м <sup>3</sup> /ч, $p = 5$ бар	59 м <sup>3</sup> /ч, $p = 2$ бар	Прибл. 8,5 ч	44 м <sup>3</sup> /ч · 8,5 ч = = 374 м <sup>3</sup> /день (12,2 л/с)
Транспортировка свежего или регенерированного угля, максимум один раз в месяц	9 + 2 м <sup>3</sup> /ч, $P_{абс} = 1$ бар	37 м <sup>3</sup> /ч, $p = 5$ бар	48 м <sup>3</sup> /ч, $p = 2,4$ бар	Прибл. 14 ч	39 м <sup>3</sup> /ч · 14 ч = = 546 м <sup>3</sup> /день (10,8 л/с)
Общее					920 м <sup>3</sup> /день, максимум один раз в месяц

Таблица 23. Потребности в технической, охлаждающей и движущей воде (нехлорированная вода)

Описание	Среднее количество	Максимальное количество – номинальная мощность станции	Максимальное количество + 25 % мощности станции	Требуемое давление, бар
Сульфат алюминия для коагуляции	205 м <sup>3</sup> /день = = 8,5 м <sup>3</sup> /ч = = 2,4 л/с	Количество макс., номин.: 44 + 19,1 = = 63,1 м <sup>3</sup> /ч = = 17,5 л/с	Максимальное количество + 25 %: 44 + 19,1 · 1,25 = = 67,9 м <sup>3</sup> /ч = 18,9 л/с	Мин. 2,5
Полиэлектролит для обработки воды и промывной воды	232 м <sup>3</sup> /д = = 9,7 м <sup>3</sup> /ч = = 2,7 л/с	Количество макс., номин.: 8,1 + 23,1 + 1,2 = = 32,4 м <sup>3</sup> /ч = 9 л/с	Максимальное количество + 25 %: 31,2 · 1,25 + 1,2 = = 40,2 м <sup>3</sup> /ч = 11,2 л/с	Мин. 2,5
Полиэлектролит для кондиционирования осадка	480 м <sup>3</sup> /д = = 20 м <sup>3</sup> /ч = = 5,6 л/с	Количество макс., номин.: 80 м <sup>3</sup> /ч = 22,2 л/с	Максимальное количество + 25 %: 80 · 1,25 = = 100 м <sup>3</sup> /ч = 27,8 л/с	Мин. 2,5
Водный раствор аммиака для обеззараживания	0,3 л/с	Количество макс., номин.: 0,5 л/с	Максимальное количество + 25 %: 0,6 л/с	Мин. 2,5
Охлаждающая вода (отдельные насосы) для озона	2 насоса в работе, 27,8 л/с	3 насоса в работе, 41,6 л/с	3 насоса в работе, 41,6 л/с	Мин. 2,5
Движущая вода для гидравлической транспортировки гранулированного активированного угля (один раз в месяц)	Неизвестно	12,2 л/с	12,2 л/с	5,0
<b>Общее – без охлаждающей воды</b>	<b>11 л/с</b>	<b>61,4 л/с</b>	<b>70,7 л/с</b>	
<b>Общее – с охлаждающей водой</b>	<b>38,8 л/с</b>	<b>103 л/с</b>	<b>112,3 л/с</b>	

Таблица 24. Баланс массы воды для обратной промывки

Эксплуатационный режим	Нормальная (расчетная) мощность	25%-ная перегрузка	25 % сверх перегрузки
Продолжительность работы фильтра, ч	48	36	24
Количество циклов обратной промывки в день	10	13	20
Общий объем обратной промывки, м <sup>3</sup> /день	9	12	18
Уровень рециркуляции использованной воды обратной промывки, исходя из 24-часового режима эксплуатации, м <sup>3</sup> /ч	375	500	750
Максимальный уровень рециркуляции использованной воды обратной промывки, м <sup>3</sup> /ч	800	800	800

Таблица 25. Сводный баланс массы химических веществ

Химическое вещество	Расход при обработке, м <sup>3</sup> /ч	Продолжительность операции	Максимальная дозировка и потребление	Средняя дозировка и потребление	Годовое потребление как среднее для номинальной мощности
Сульфат алюминия для коагуляции Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 18 H <sub>2</sub> O / (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	15,417	24 ч/сут, 365 дней/год	80 г/м <sup>3</sup> (12 г/м <sup>3</sup> ), 1232,6 кг/ч (184,9 кг/ч)	30 г/м <sup>3</sup> (4,6 г/м <sup>3</sup> ), 462,2 кг/ч, 71 кг/ч	4049 т/год (622 т/год)
Полиэлектролит для обработки воды и промывной воды	15,417	24 ч/сут, 365 дней/год	1 г/м <sup>3</sup> , 15,42 кг/ч	0,3 г/м <sup>3</sup> , 4,62 кг/ч	40,5 т/год
Полиэлектролит для кондиционирования осадка	200	6 ч/сут, 260 дней/год	200 г/м <sup>3</sup> осадка, 2 · 20 кг/ч	100 г/м <sup>3</sup> осадка, 2 · 10 кг/ч	31,2 т/год
Водный раствор аммиака для обеззараживания, 25%-ный раствор	19,271	24 ч/сут, 365 дней/год	0,8 мг/л, 15,4 кг/ч	0,5 мг/л, 7,7 кг/ч	67,5 т/год
Гипохлорит натрия для обеззараживания NaOCl (как Cl <sub>2</sub> ), 0,8%-ный раствор	19,271	24 ч/сут, 365 дней/год	2,5 мг/л, 48,15 кг/ч, 6,02 м <sup>3</sup> /ч	1,6 мг/л, 24,65 кг/ч, 3,08 м <sup>3</sup> /ч	215,9 т/год, 26981 м <sup>3</sup> /год

**Примечания:**

- для максимальной мощности станции (19,271 м<sup>3</sup>/ч) все показатели для квасцов и полиэлектролита на 25 % выше;
- для водного раствора аммиака и гипохлорита натрия максимальная дозировка и потребление вычисляются для максимальной мощности станции, средняя дозировка и потребление – для номинальной работы.

Таблица 26. Потребление электроэнергии для технологического оборудования по производственным и технологическим этапам

Описание	Количество приборов	Количество приборов в работе	Установленная мощность для одного блока, кВт	Рабочий период, ч/день	Рабочий период, день/год	Примечания
<i>А. Производство озона для предварительного озонирования</i>						
Компрессор	3+1	3	75 кВт	24	365	
Сушилка	3+1	3	0,5 кВА	24	365	
Генератор озона	3	3	265 кВА	24	365	
Утилизатор озона	1+1	1	19,3 кВА	24	365	
Насосы охлаждающей воды	3+1	3	На	24	365	Указано в механических разработках
<i>В. Освещение</i>						
Высокоскоростная мешалка	4	4	3	24	365	
Вертикальные мешалки в первой камере флокуляции	4	4	7,5	24	365	
Вертикальная мешалка во второй камере флокуляции	8	8	3	24	365	
Вертикальная мешалка в третьей камере флокуляции	8	8	1,5	24	365	
Электропривод для скребка	4	4	0,55	24	365	
Насосы рециркуляции осадка	4+2	4	22	12	365	
Оборудование для удаления осадка	4+2	4	7,5	12	365	
<i>С. Сульфат алюминия для коагуляции</i>						
Транспортировочные насосы с магнитным взаимодействием	1+1	1	5,5	5	365	
Магнитный индуктивный расходомер	1	1	-			4-20 мА

Мешалки в складских резервуарах	3	3	5,5	24	365	
Ультразвуковое устройство обозначения уровня в складских резервуарах	3	3	-			230 VAC
Магнитный индуктивный расходомер	1	1	-			4–20 мА
Насосы-дозаторы с преобразователем частоты	4+2	4	2,2	24	365	
Магнитный индуктивный расходомер	4	4	-			4–20 мА
<i>D. Полиэлектролит для флокуляции</i>						
Воздушный вентилятор для транспортировки сухих материалов	2	2	0,9		365	
Подготовительное устройство с двумя мешалками	2	2	3	24	365	
Магнитный индуктивный расходомер	5	5	-			4–20 мА
Насосы-дозаторы для основной линии с преобразователем частоты	4+2	4	1,1	24	365	
Насосы-дозаторы для линии обратной промывки с преобразователем частоты	1+1	1	0,37	24	365	
<i>E. Гипохлорит натрия</i>						
Нагнетательный насос – дополнительный	1	1	2,2	15	365	
Ультразвуковое устройство обозначения уровня в складских резервуарах	2	2	-			4–20 мА
Защита от переполнения	2	2	-			230/50
Сенсор утечек	1	1	-			230/50
Насосы-дозаторы с преобразователем частоты	2+1	2	1,5	24	365	
Магнитный индуктивный расходомер	2	2	-			4–20 мА

Таблица 2б (окончание)

Описание	Количество приборов	Количество приборов в работе	Установленная мощность для одного блока, кВт	Рабочий период, ч/день	Рабочий период, день/год	Примечания
<i>F. Водный раствор аммиака</i>						
Нагнетательный насос – дополнительный	1	1	2,2	0,5	365	
Ультразвуковое устройство обозначения уровня в складских резервуарах	2	2	-			4–20 мА
Защита от переполнения	2	2	-			230/50
Сенсор утечек	1	1	-			230/50
Насосы-дозаторы с преобразователем частоты	1+1	1	0,37	24	365	
Магнитный индуктивный расходомер	1	1	-			4–20 мА
Детектор газа с мигающей лампочкой-индикатором и звуковым сигналом	1	1	-			
Вытяжной вентилятор (400 В, 0,22 А, 50 Гц)	1	1	0,12			
<i>G. Очистка воды обратной промывки</i>						
Устройства для перемешивания воды обратной промывки в складских резервуарах	4	4	2,8	24	365	
Устройство для перемешивания при флокуляции	1	1	0,18	24	365	
Электропривод для скребка	1	1	0,12	24	365	
Оборудование для удаления осадка	1+1	1	5,5	4	365	



<i>Н. Уплотнение осадка</i>						
Электропривод для скребка во вторичном уплотнителе	2	2	0,55	24	365	
<i>И. Полиэлектролит для обработки осадка</i>						
Воздушный вентилятор для транспортировки сухих материалов	2	2	0,9			
Подготовительное устройство с двумя мешалками	2	2	2,55	24	365	
Магнитный индуктивный расходомер	2	2	-			4–20 мА
Насосы-дозаторы полиэлектролита с преобразователем частоты	2+1	2	1,5	6	260	
<i>Ж. Обезвоживание осадка</i>						
Насосы предварительного наполнения	2	2	30	6	260	
Мембранные поршневые насосы высокого давления	2	2	30	6	260	
Устройство для открытия/закрытия блока пластин	2	2	15	16	260	
Устройство для перемещения пластин	2	2	1,1	16	260	
Винтовой конвейер кека	2	2	7,5	16	260	
Поперечный винтовой конвейер	1	1	5,5	16	260	
Поднимающий ленточный конвейер	1	1	11	16	260	
Насос высокого давления для системы промывки фильтрующей ткани	1	1	30			
Мотор для перемещения ролика	1	1	0,18			
Мотор для промывной установки	1	1	0,75			
Компрессор для обдува стержня и технического воздуха	1	1	5,5			

Таблица 27. Экспертиза производства питьевой воды (водоснабжение). Затраты энергии на приготовление продукта «питьевая вода» на примере АО «Мосводоканал»

Потребление электроэнергии Технологии водоподготовки	Единицы измерения	Подъем		Первичная обработка		Отстаивание, фильтрование		Озонирование, сорбция		Подъем в РЧВ и НС-2п		Потери
		Гидротехническое сооружение	НС-1п	Реагентная обработка	Озон	Отстойники	Фильтры	Озон	Сорбция	РЧВ	НС-2п	
Объем потребленной электрической энергии за отчетный период	Тыс. кВт·ч	13815,8	230235,31	8011,82	4248,36	3917,03	13364,57	7531,17	1628,8	4314,34	195114,7	4231,59/4710,77
Фактический расход электроэнергии в отчетном периоде	кВт·ч / м <sup>3</sup>	0,013	0,21	0,007	0,018	0,003	0,011	0,018	0,004	0,004	0,182	0,063/0,184
Суммарные затраты на приготовление питьевой воды с учетом потерь	Тыс. кВт·ч (%)	482181,19										8942,36 (1,82)

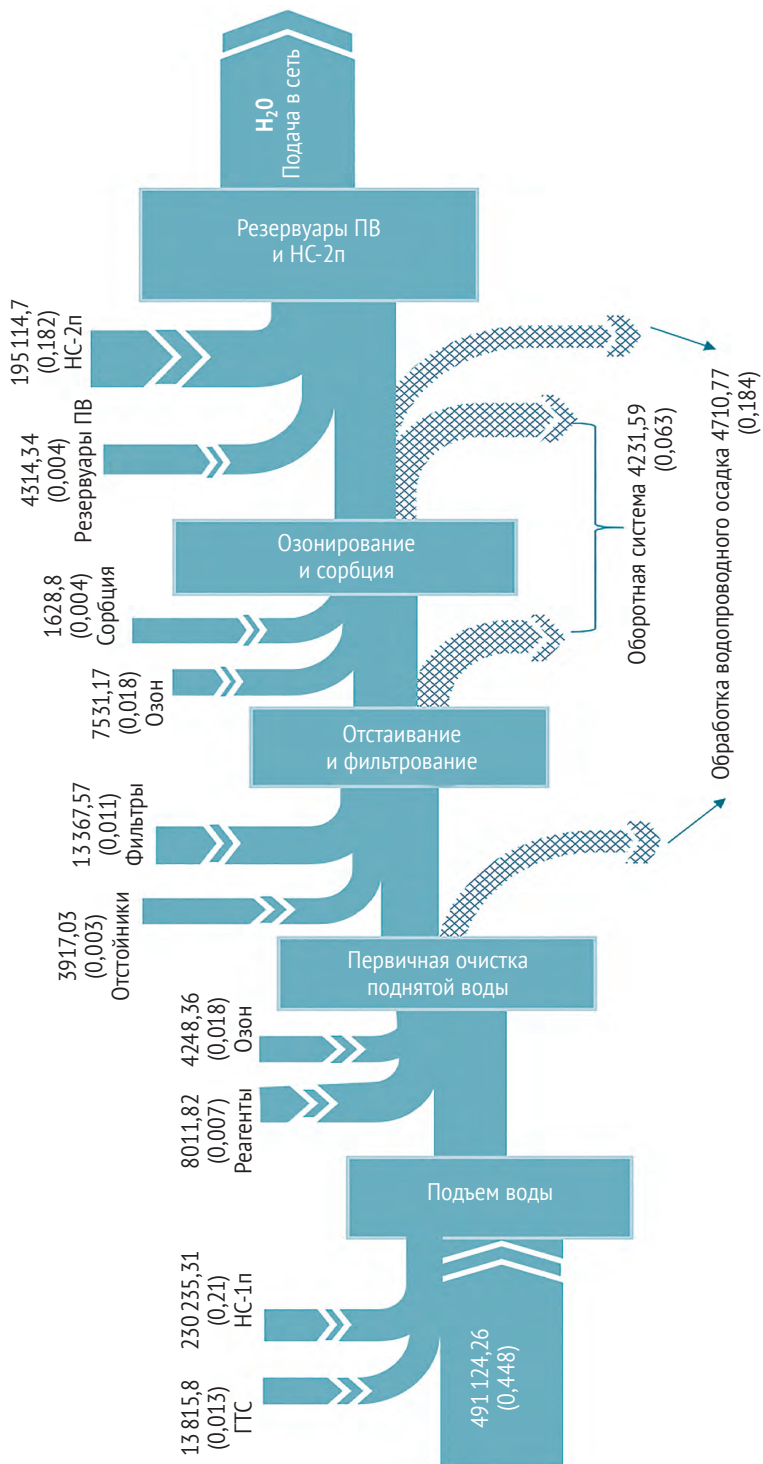


Рис. 59. Диаграмма потоков энергии (эксергии) для технологической схемы производства питьевой воды на примере идеализированной схемы АО «Мосводоканал», тыс. кВт·ч (кВт·ч/м³)

Классическая термодинамика под эксергией понимает способность рабочего тела производить работу. Оценка эффективности с помощью эксергетического КПД ( $\eta_{\text{экс}}$ ) показывает, какая доля энергии (в основном — теплоты) преобразуется в работу. Однако такая оценка не позволяет судить о том, насколько полно использована эксергия, то есть о степени термодинамического совершенства преобразования энергии в установке.

Эксергетический анализ позволяет судить о термодинамическом совершенстве всей установки и ее частей. В общем случае эксергетический КПД представляет собой отношение полезно усвоенной эксергии к затраченной, то есть характеризует степень необратимости реальных процессов и циклов, протекающих в различном теплотехническом оборудовании, и определяется по формуле:

$$\eta_{\text{экс}} = \frac{E_{\text{пол}}}{E_{\text{затр}}} \times 100 = \frac{(E_{\text{затр}} - E_{\text{пот}})}{E_{\text{затр}}} \times 100,$$

где  $\eta_{\text{экс}}$  — эксергетический КПД, %;

$E_{\text{пол}}$  — полезно усвоенная эксергия;

$E_{\text{затр}}$  — затраченная эксергия;

$E_{\text{пот}}$  — потери эксергии.

Условие повышения энергетической эффективности технологического процесса также может быть сформулировано в виде

$$d\eta_{\text{экс}} / dt < 0,$$

то есть повышение энергоэффективности происходит при увеличении эксергетического КПД системы.

Несмотря на то что условие повышения энергетической эффективности при эксергетическом анализе формулируется аналогично тепловому КПД, результаты эксергетического анализа дают отличные результаты.

Процессы водоподготовки довольно сложны для применения к ним оценочного подхода на базе эксергетического анализа, тем не менее такой подход возможен. Реализовать его можно на основе моделирования как идеализированного процесса, так и совокупности последовательных подпроцессов.

Рассмотрим энергетические и эксергетические показатели установок модельного процесса водоподготовки на примере схемы водоподготовки, применяемой на предприятиях АО «Мосводоканал». Для реализации применимости эксергетического подхода к полному циклу водоподготовки рассмотрим идеализированную модель. В данном случае принимаем приближение, что практически вся затрачиваемая энергия переходит в полезную работу.

Для данного идеализированного процесса производства питьевой воды КПД основного процесса составляет 98,15 %. Как видно, даже идеализированный процесс не дает КПД в 100 %, это связано с необходимостью отведения примесей из очищаемой воды, что и является процессом очистки. При этом продуктом представляется именно очищенная вода, это и позволяет нам говорить о высоком энергетическом КПД процесса.

Для эксергетического анализа модели определим свойства воды как рабочего тела при определенных параметрах окружающей среды. Для воды при  $\rho_0 = 0,1$  МПа и  $t_0 = 10^\circ \text{C}$ ;  $h_0 = 42,1$  кДж/кг;  $s_0 = 0,1511$  кДж/(кг·К); теплоемкость воды 75,3 Дж/(моль·К).

В связи с тем что работа при водоподготовке не связана напрямую с теплотами, в основном затрачивается эксергия, равная эксергии химической энергии (термодинамические константы соответствующих реакций); эксергия топлива, затрачиваемого на обеспечение работы узлов системы, зависит от его состава и может быть принята равной его низшей теплоте сгорания  $Q_p^H$ , кДж/кг топлива.

Часть работы расходуется на выведение из системы примесей, частично потери эксергии связаны с протеканием ряда конкурирующих реакций (расчет проводился на основании термодинамических констант основных реакций) и другими процессами. Согласно полному энергетическому балансу идеализированной схемы производства питьевой воды, эксергетический КПД составит  $\eta_{\text{экс}} = 87\%$  при усредненном значении эксергетических потерь процесса  $\Pi = 10$  кДж/м<sup>3</sup> (коэффициент эксергетических потерь  $\eta_{\text{эт}} = 0,12$ ).

Эксергетический КПД любого обратимого цикла равен единице.

В условиях идеализированной модели потерей является лишь то, что вызвано отступлением от идеализированных условий, например, наличием разности температур при отводе теплоты, что и характеризуется потерей эксергии. Оценить долю этой потери можно по формуле:

$$\Delta e_k = q_2 \left( 1 - \frac{T_0}{T_2} \right),$$

где  $q_2$  — количество отводимой теплоты;

$T_0$  и  $T_2$  — температуры идеальной и реальной реакций соответственно.

При сопоставлении результатов энергетического и эксергетического анализов обращает на себя внимание существенное различие в оценке потерь. При энергетическом КПД идеализированного процесса в 98,15% его эксергетический КПД составляет порядка 78%. Связано это с тем, что при энергетическом анализе процесс рассматривается фактически как идеальный, в котором есть лишь незначительные потери с выводимыми реагентами и за счет теплообмена с окружающей средой. Как организованы процессы использования химической энергии и передачи работы, при этом не учитывается. При эксергетическом анализе выявляется роль процесса и эксергии химической энергии.

Рассмотрим один из этапов водоподготовки также на примере различных схем одного подпроцесса. Наиболее важным процессом при подготовке питьевой воды является обеззараживание, при этом выбор метода обеззараживания представляет собой сложную задачу. При химических способах обеззараживания питьевой воды для достижения стойкого обеззараживающего эффекта необходимо правильно определить дозу вводимого реагента и обеспечить достаточную длительность контакта его с водой. Доза реагента определяется пробным обеззараживанием или расчетными методами. Для поддержания необходимого эффекта при химических способах обеззараживания питьевой

воды доза реагента рассчитывается с избытком (остаточный хлор, остаточный озон), гарантирующим уничтожение микроорганизмов, попадающих в воду некоторое время после обеззараживания.

Озонирование основано на свойстве озона разлагаться в воде с образованием атомарного кислорода, разрушающего ферментные системы микробных клеток и окисляющего некоторые соединения, придающие воде неприятный запах (например, гуминовые основания). Количество озона, необходимое для обеззараживания питьевой воды, зависит от степени загрязнения воды и составляет 1–6 мг/л при контакте 8–15 мин; количество остаточного озона должно быть не более 0,3–0,5 мг/л, т. к. более высокая доза придает воде специфический запах и вызывает коррозию водопроводных труб. С гигиенической точки зрения озонирование — один из лучших способов обеззараживания питьевой воды. Однако в связи с большим расходом электроэнергии, использованием сложной аппаратуры и высококвалифицированного персонала озонирование нашло применение для обеззараживания питьевой воды только при централизованном водоснабжении.

Таким образом, основные энергозатраты связаны с процессами озонирования и обработкой ультрафиолетом.

Алгоритмизация выбора технологий водоподготовки (поверхностная вода) основана в первую очередь на составе исходной воды, количестве и перечне основных загрязнителей. Для рассмотрения было выбрано несколько технологических схем для вод класса А (табл. 28).

Таблица 28. Эксергетические КПД различных схем способов обеззараживания питьевой воды на примере вод класса А

№ п/п	Технологическая схема	Содержание примесей, коагулянтов, флокулянтов, мас. %		Удельная реакционная составляющая эксергии*, кДж/м <sup>3</sup>	Усредненный эксергетический КПД процесса, %
		Предел	Принято для расчета		
1	Хл → К(Ф) → ХлО → ОтР → СкФР → УФ-об	0–1	1	36,49	57
		1–5	5	28,15	
2	К → УУФ → Хл	0–1	1	25,98	46
		1–5	5	19,12	
3	ОЗ(1) → К(Ф) → ФлР → СкФР → ОЗ(2) → СрГУ → УФ-об → Хл	0–1	1	26,39	52
		1–5	5	20,01	

\* Следует учесть, что чем выше уровень загрязненности вод на начальном этапе, тем ниже показатели эксергии процесса в целом за счет роста уровня удаляемого из процесса вещества.

Обозначения в таблице 28: Хл — обработка хлором (гипохлоритом натрия, кальция); К(Ф) — обработка воды коагулянтами и флокулянтами; ХлО — хлоробразование скоагулированных частиц в свободном или стесненном объеме; ОтР — реагентное отстаивание, в том числе отстаивание с микропеском; СкФР — реагентное скорое фильтрование, включая контактные, динамические осветлители (гравий, песок, инертная плавающая загрузка); УФ-об — обработка воды УФ-облучением; ОЗ — обработка воды озоном; ФлР — флотация с применением реагентов; СрГУ — сорбционная доочистка в стационарном слое адсорбента; УУФ — ультрафильтрация.

Для технологических аппаратов, не производящих механической работы, эксергетический КПД может быть определен как:

$$\eta_{\text{экс}} = E'' / E',$$

где  $E''$  — поток эксергии на выходе;

$E'$  — поток эксергии на входе, Вт.

Отсюда получаем:

$$E'' = E' - D_e,$$

где  $D_e$  — сумма потерь эксергии в окружающую среду, Вт.

Тогда эксергетический КПД может быть определен через зависимость:

$$\eta_{\text{экс}} = 1 - D_e / E'.$$

Существенное влияние на водоподготовку оказывает этап забора воды из источника водоснабжения. Здесь основным параметром будет достигаемое в трубах давление, что в свою очередь определяется количеством затраченной энергии и качественными характеристиками самих труб:

$$\Delta P_{\text{вд}} = \left( \frac{\lambda_{\text{тр}} l n_x}{d} + \sum \xi_{\text{мс}i} \right) \omega_{\text{вд}}^2 \frac{\rho_{\text{вд}}}{2}, \text{ Па},$$

где  $l$  — длина труб теплообменника, м;

$n_x$  — число ходов по трубному пространству;

$\omega_{\text{вд}}$  — скорость потока воды внутри труб, м/с;

$\rho_{\text{вд}}$  — плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$\lambda_{\text{тр}}$  — коэффициент трения;

$\sum \xi_{\text{мс}i}$  — сумма коэффициентов местных сопротивлений.

Значение критерия Рейнольдса:

$$Re_{\text{вд}} = \omega_{\text{вд}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \frac{\rho_{\text{вд}}}{\mu_{\text{вд}}},$$

где  $\mu_{\text{вд}}$  — коэффициент динамической вязкости воды, Па·с;

$\omega_{\text{вд}}$  — средняя скорость воды, м/с:

$$\omega_{\text{вд}} = \frac{G_{\text{вд}}}{\rho_{\text{вд}} f_{\text{вд}}},$$

где  $f_{\text{вд}}$  — площадь сечения для прохода воды.

Согласно усредненным данным,  $\omega_{\text{вд}} = 0,9$  м/с, тогда  $Re_{\text{вд}}$  составляет не более 14 000.

Для стальных цельнотянутых труб при незначительной коррозии шероховатость стенки составляет  $e = 0,2$  мм.

Также следует учесть, что в интервале значений  $\frac{500d_{\text{вн}}}{e} > Re_{\text{вн}} > \frac{d_{\text{вн}}}{e}$ , режим течения воды считается турбулентным.

Определение площади водоприемного отверстия (брутто) одной секции  $\omega_{\text{вдбр}}$ , м<sup>2</sup> следует проводить при одновременной работе всех секций водозабора (кроме резервных) по формуле:

$$\omega_{\text{вд бр}} = 1,25q_p \frac{K_{\text{ст}}}{V_{\text{вт}}},$$

где  $V_{\text{вт}}$  — скорость втекания в водоприемные отверстия, м/с, отнесенная к их сечению в свету;

1,25 — коэффициент, учитывающий засорение отверстий;

$q_p$  — расчетный расход одной секции, м<sup>3</sup>/с;

$K_{\text{ст}}$  — коэффициент, учитывающий стеснение отверстий стержнями решеток или сеток, принимаемый  $K_{\text{ст}} = (a_{\text{ст}} + c_{\text{ст}})/a_{\text{ст}}$  для решеток и  $K_{\text{ст}} = [(a_{\text{ст}} + c_{\text{ст}})/a_{\text{ст}}]^2$  для сеток, где  $c_{\text{ст}}$  — расстояние между стержнями в свету, мм.

В таблице 29 приведены эксергетические КПД водозабора при ориентировочных скоростях движения воды в самотечных и сифонных воловодах.

Таблица 29. Эксергетические КПД водозабора при ориентировочных скоростях движения воды в самотечных и сифонных воловодах при нормальном режиме работы водозаборных сооружений

Диаметр воловодов, мм	Скорость движения воды, м/с, в водозаборах категорий		Усредненный эксергетический КПД процесса, %
	I	II и III	
300–500	0,7–1,0	–	67
500–800	1,0–1,4	–	72
> 800	1,5	–	70
300–500	–	1,0–1,5	60
500–800	–	1,5–1,9	64
> 800	–	2,0	63

## ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

### Обработка осадков после обработки воды питьевого назначения

#### Происхождение осадков

Осадки, остающиеся после обработки воды питьевого назначения, образуются в результате извлечений или прочисток на стадии отстаивания (или флотации), если они предусмотрены, и от промывки фильтров, а иногда от обратной промывки мембран осветления.

Взвешенные вещества (ВВ), содержащиеся в таких осадках, включают в себя:

- вещества, присутствующие в воде до обработки: фитопланктон, выпавшие хлопьями минеральные и органические вещества, гидроксиды металлов, образующиеся из ионов, присутствующих в сырой воде (железо, марганец);
- гидроксиды металлов, образовавшиеся из реагентов коагуляции-флокуляции, введенных во время обработки;
- иногда — адсорбирующие материалы (ПАУ<sup>78</sup>, остатки оторвавшейся биологической пленки с фильтров с ГАУ<sup>79</sup>).

<sup>78</sup> ПАУ — порошковый активированный уголь.

<sup>79</sup> ГАУ — гранулированный активированный уголь.



При декарбонизации известью существенную часть осадков составляет карбонат кальция.

#### *Коагуляция на фильтре*

Средняя концентрация ВВ в промывных водах фильтров может меняться от 200 до 1500 г/м<sup>3</sup>. Необходимо использовать установку сгущения, способную давать осадки, концентрация ВВ в которых составила бы как минимум 20 г/л, чтобы впоследствии их можно было подвергнуть обезвоживанию.

#### *Полная обработка воды*

Когда технологическая линия осветления включает в себя коагуляцию, флокуляцию, первичное разделение фаз (отстаивание или флотацию) и фильтрацию, сооружения обработки воды производят два типа осадка.

Промывные воды фильтров накапливаются в резервуаре, объем которого соответствует объему промывных вод одного или (лучше) двух фильтров. Раньше они возвращались в голову станции без какой-либо предварительной обработки; в настоящее время это не рекомендуется (в некоторых странах даже запрещается). Отказ от предварительного хлорирования на многих станциях приводит иногда к неконтролируемому развитию водорослей и/или бактерий на фильтрах и в системе рециркуляции, что может ухудшить качество поступающей на обработку воды. Кроме того, если есть подозрение о присутствии цист простейших паразитов, которые будут эффективно задерживаться фильтрами и присутствовать в промывных водах, то можно ожидать, что они будут насыщать и поступающую на осветление воду. Следовательно, необходимо их извлечь вместе с ВВ перед рециркуляцией, для чего обычно используют следующие установки и технологии:

- статический сгуститель;
- статический сгуститель с рециркуляцией;
- флотацию.

Объем осадков, получаемых на стадии первичного разделения фаз, зависит от природы воды и использованной технологии. Осадки составляют в среднем от 0,5 до 2,0% обработанного объема воды. Если невозможно отвести осадки в городскую канализацию, должна быть предусмотрена их обработка на месте с использованием технологий сгущения и обезвоживания.

Если коагулянтom является сульфат алюминия, можно в некоторых случаях рассматривать его восстановление (раскисление), хотя обычно эта операция экономически не оправдана.

Окончательное решение по выбору методов обработки и утилизации водопроводного осадка должно приниматься только с учетом технико-экономического сравнения различных вариантов и их эколого-гигиенической значимости в каждом конкретном случае. Всегда с целью внедрения уже разработанных методов утилизации необходимо ускорить строительство на водопроводных станциях цехов механического обезвоживания водопроводного осадка. Необходимо также дальнейшее развитие исследований особенностей образования и важнейших свойств водопроводного осадка на различных по

своим природным и конструктивным особенностям водопроводных станциях, совершенствование известных и разработка новых способов его экономически и экологически оправданной утилизации, их внедрение в практику.

## РОЛЬ ОТРАСЛИ В ГЛОБАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Чистая и доступная вода является неотъемлемой частью жизни. Наличие доступа к чистой воде — базовое условие экономического и социального благополучия населения. Более 40 % населения Земли страдает от нехватки воды, что провоцирует голод, болезни, нищету, отсутствие возможностей для развития. По оценкам экспертов, три из четырех рабочих мест, составляющих глобальную рабочую силу, в значительной или умеренной степени зависят от водопотребления. Начиная с 1980-х гг. потребление воды во всем мире увеличивается примерно на 1 % в год, что обусловлено сочетанием роста населения, социально-экономического развития и изменения моделей потребления. Ожидается, что глобальный спрос на воду будет продолжать расти аналогичными темпами до 2050 г., что на 20–30 % превысит нынешний уровень водопользования, главным образом за счет роста спроса в промышленном и бытовом секторах.

Более 2 млрд человек живет в странах, испытывающих высокий водный стресс, и около 4 млрд человек испытывает острую нехватку воды по крайней мере в течение одного месяца в году. Ситуация будет усугубляться по мере роста населения, деградации водных источников и нерационального использования запасов пресной воды<sup>80</sup>. Оценки показывают, что если деградация природной среды и истощение глобальных водных ресурсов продолжатся, то 45 % мирового валового внутреннего продукта (ВВП), 52 % населения мира и 40 % мирового производства зерна окажутся под угрозой к 2050 г. Прежде всего проблема затронет бедные слои населения, что еще больше усугубит и без того растущее неравенство.

В повестке дня в области устойчивого развития ООН доступ к воде и средствам санитарии выделен в отдельную цель: «Обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех» (ЦУР 6). Достижение ЦУР 6 предусматривает расширение международного сотрудничества и поддержку укрепления потенциала развивающихся стран в осуществлении деятельности и программ, касающихся водоснабжения и санитарии. Эта деятельность включает в себя сбор и опреснение воды, повышение эффективности водопользования.

В России задача обеспечения населения безопасной питьевой водой также относится к приоритетным направлениям развития<sup>81</sup>. Доля населения, обеспеченного питьевой водой, соответствующей требованиям безопасности, проживающего в городских поселениях, увеличилась на 0,6 % и составила в 2017 г. 96,0 %, в сельских — на 0,8 % (78,3 % в 2017 г.). В частности, по данным Роспотребнадзора,

---

<sup>80</sup> Данилов-Данильян В. И., Лосев К. С. Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты. — М. ; СПб. : Наука, 2006.

<sup>81</sup> Данилов-Данильян В. И. и др. Экологическая безопасность = Ecological safety: общие принципы и российский аспект : учеб. пособие. — М. : МППА БИМПА, 2007.

в 2017 г. качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения было обеспечено 87,5% населения страны, в том числе 94,5% городского и 67,1% сельского населения. В 2018 г. питьевой водой из указанных систем водоснабжения, соответствующих требованиям безопасности, было обеспечено 87,6% населения Российской Федерации (табл. 30), в том числе 94,7% городского и 67,3% сельского населения. Иначе говоря, ежегодно имеет место некоторое, но относительно небольшое улучшение данных индикаторов.

Таблица 30. Доля населения, обеспеченного питьевой водой, отвечающей требованиям безопасности, в общей численности населения

Наименование показателя	2010 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.
Доля населения, обеспеченного питьевой водой, отвечающей требованиям безопасности, в общей численности населения, %	86,5	90,3	90,7	91,4	91,3	88,3
Динамика к предыдущему периоду, %	-	4,4	0,4	0,8	-0,1	-3,3

Потребителями услуг централизованного водоснабжения являются более 124 млн человек. Таким образом, 84% жителей РФ обеспечено услугами централизованного водоснабжения.

Вызов сегодняшнего дня для развития инфраструктуры водообеспечения — потребность в расширении сетевого хозяйства и увеличение его мощности для обеспечения увеличивающейся площади жилого фонда при падении объемов потребления.

Протяженность водопроводных сетей с 2009 по 2019 г. увеличилась на 9,56%, в то же время производственная мощность насосных станций 1-го подъема уменьшилась на 3,7%. При этом за 10 лет (с 2009 по 2020 г.) потребление воды сократилось на 24%.

Отметим, что динамика коммунального водоснабжения коррелирует с динамикой водопользования в целом (рис. 60), которая далеко не всегда соответствует вектору и темпам общеэкономического развития.

Так, например, в 2010 г., в котором рост валового внутреннего продукта России по сравнению с предыдущим годом составил 4,5% в сопоставимых ценах, объем водозабора на все нужды также возрос на 5% и достиг почти 79,0 млрд м<sup>3</sup>. В 2015 г. рассматриваемый водозабор сократился: его объем оказался равен 68,6 млрд м<sup>3</sup>, что на 3,1% меньше уровня предыдущего года. Характерно, что, по оценкам Росстата, ВВП страны в 2015 г. уменьшился на 2,3%. В 2017 г. суммарный забор воды оказался на уровне 68,9 млрд м<sup>3</sup>, или на 0,9% ниже величины предыдущего года. ВВП страны, исчисленный в сопоставимых ценах, по имеющимся оценкам, возрос за 2017 г. на 1,6%. В отчетном 2018 г. общее изъятие воды равнялось 68,0 млрд м<sup>3</sup>, т. е. на 1,2% меньше, чем в 2017 г., при росте физического объема ВВП, по расчетам, почти на 2,3%. Таким образом, с 2010 по 2018 г. показатель общего водозабора в Российской Федерации уменьшился почти на 14% при росте физического объема ВВП за тот же период приблизительно на 12–13%.

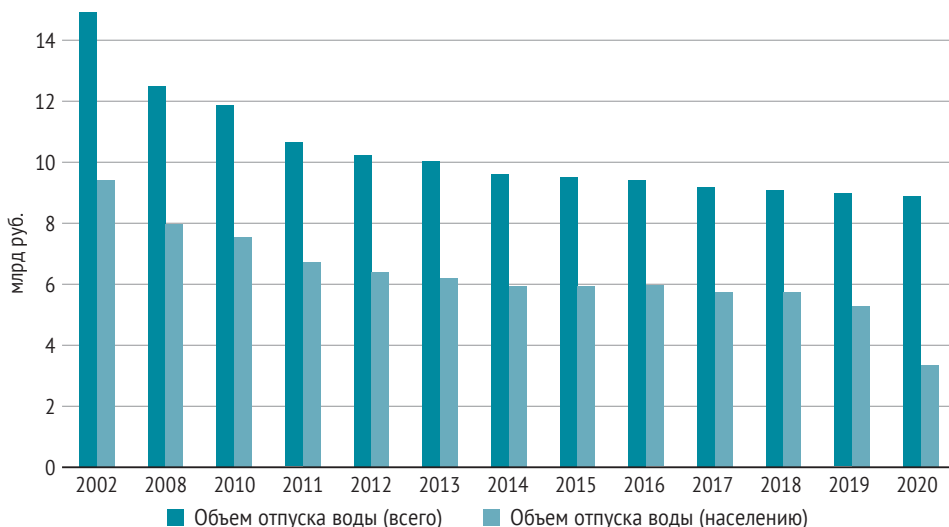


Рис. 60. Динамика объемов потребления услуг ВКХ, млрд руб. (водоснабжение)

Как уже было отмечено, в отчетном 2018 г. по сравнению с предыдущим годом также наблюдалось небольшое уменьшение забора воды при определенном росте ВВП. В таблице 31 приведены сводные данные по объему водозабора на единицу ВВП за 20-летний период.

Таблица 31. Объем водозабора на единицу валового внутреннего продукта

Год	Общий забор воды из природных источников на все нужды, млн м <sup>3</sup>	ВВП в текущих ценах, млрд руб.*	Водозабор к ВВП, в текущих ценах, м <sup>3</sup> /тыс. руб.
2000	85 940,40	7305,6	11,76
2005	79 472,50	21 609,8	3,68
2010	78 955,50	46 308,5	1,70
2011	75 220,50	60 282,5	1,25
2012	72 052,60	68 163,9	1,06
2013	69 924,70	73 133,9	0,96
2014	70 806,80	79 199,7	0,89
2015	68 614,24	83 387,2	0,82
2016	69 498,54	86 148,6	0,81
2017	68 887,55	92 037,2	0,75
2018	69 278,70	103 861,7	0,66
2019	68 298,90	109 241,5	0,63
2020	61 790,90	106 967,5	0,58

\* Начиная с 2011 г. данные не вполне сопоставимы с данными за последующие годы из-за изменения методологии расчетов; аналогичная методологическая корректировка имеет место с данными за 2014 г. За 2018 г. приведена предварительная оценка.

### *Финансово-экономические показатели водоснабжения*

Особенно сложной задачей является измерение запасов воды в стоимостном выражении. Основная проблема состоит в том, что исторически вода часто предоставляется бесплатно в качестве общественного блага, поставляется по цене ниже себестоимости с целью поддержки сельскохозяйственного производства или по фиксированному тарифу, так как считается, что дефицита воды быть не может. Вследствие этого денежная цена воды, как правило, увязывается с фиксированными инфраструктурными затратами на ее сбор и транспортировку до точек назначения, а не с фактическим объемом используемой воды, который может ощутимо варьироваться.

С учетом этой ситуации стандартные подходы к стоимостной оценке активов окружающей среды не работают, поскольку получаемая таким образом ресурсная рента в соответствии со стандартными определениями имеет отрицательное значение. Показатели отрицательной ресурсной ренты возникают, когда доходы, полученные от продажи забранной воды, не покрывают расходы на обслуживание произведенных активов, необходимых для работы водопроводных сетей. Следовательно, стоимость самих водных ресурсов считается равной нулю.

Переход к экономике устойчивого развития требует кардинального изменения системы учета природных ресурсов в макроэкономических показателях.

В части водных ресурсов Минприроды разработало методологию оценки запасов водных ресурсов в натуральном и стоимостном измерениях и их изменений за год. Методология позволяет учесть в системе национальных счетов стоимость водных ресурсов как активов государства. Оценка запасов включает в себя информацию о запасах водных ресурсов в натуральном измерении и стоимостном измерении, а также информацию об их изменении за год, в том числе по видам изменений. Оценка запасов проводится ежегодно, начиная с 2018 г., и доступна в Единой межведомственной информационно-статистической системе (ЕМИСС).

Оценке запасов подлежат следующие виды водных ресурсов:

- поверхностные воды в границах речных бассейнов, подбассейнов и водохозяйственных участков;
- подземные воды, а именно питьевые, технические, термальные (теплоэнергетические) и минеральные воды.

Оценка запасов проводится с учетом требований Системы национальных счетов. Объектом оценки являются имеющиеся запасы, доступные для использования, исходя из существующих условий (технологий, научных знаний, экономической инфраструктуры, имеющихся ресурсов и цен), т. е. располагаемые для использования водные ресурсы в поверхностных и подземных водных объектах, ограниченность которых обуславливает установление на них прав использования и определенную меру экономического контроля.

С учетом требований Водного законодательства Российской Федерации используется или может быть использована та часть запасов поверхностных вод, имеющихся на территории Российской Федерации, которая ограничена

лимитами (предельными объемами) забора (изъятия) водных ресурсов из водного объекта в границах речных бассейнов, подбассейнов и водохозяйственных участков.

Для оценки запасов поверхностных вод используется информация о лимитах забора поверхностных вод, определенных Федеральным агентством водных ресурсов на основе схем комплексного использования и охраны водных объектов, утвержденных приказами территориальных органов Федерального агентства водных ресурсов.

Для оценки запасов подземных вод используется информация о запасах следующих видов подземных вод:

- питьевых и технических вод (ЗПТ);
- минеральных вод (ЗМ);
- термальных вод (ЗТ).

Информация о стоимости запасов включает в себя сведения о стоимости запасов поверхностных вод и о стоимости запасов подземных вод.

Стоимость запасов определяется по видам водных ресурсов по формуле:

$$PV = (CF \times \sqrt{Иц}) / r,$$

где  $PV$  — стоимость запасов на конец отчетного года, млн руб.;

$CF$  — доход, получаемый от использования водных ресурсов в отчетном году (далее — природная рента), млн руб.; для поверхностных вод  $CF_1$  и для подземных вод  $CF_2$ ;

$Иц$  — индекс цен производителей по виду экономической деятельности «Забор, очистка и распределение воды»;

$r$  — коэффициент дисконтирования.

При этом стоимость водных ресурсов оценивается методом апроприации, т. е. по доходам государства (собственника) от использования водных ресурсов в отчетном году с использованием дисконтированной стоимости бесконечного аннуитетного денежного потока (вечной ренты). Стоимость определенных с помощью показанной методологии водных ресурсов России составляет приблизительно 1,5 трлн руб.

На операционном уровне, однако, стоимость воды не учитывается при определении цен на нее. Существует тенденция устанавливать такие цены на воду, которые отражали бы все расходы на управление, забор и распределение водных ресурсов. Поэтому возможность надежного обеспечения качественными услугами водоснабжения и водоотведения населения и экономики напрямую зависит от финансового обеспечения деятельности специализированных организаций.

Принятый в 2011 г. Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении»<sup>82</sup> определяет такие организации как организации водопроводно-канализационного хозяйства, осуществляющие эксплуатацию централизованных систем холодного водоснабжения и (или) водоотведения, отдельных объектов таких систем.

<sup>82</sup> Федеральный закон № 416-ФЗ от 07.12.2011 «О водоснабжении и водоотведении».

Деятельность этих организаций регулируется, а их услуги тарифицируются. Регулирование строится на следующих принципах:

- 1) приоритетность обеспечения населения питьевой водой, горячей водой и услугами по водоотведению;
- 2) создание условий для привлечения инвестиций в сферу водоснабжения и водоотведения, обеспечение гарантий возврата частных инвестиций;
- 3) обеспечение технологического и организационного единства и целостности централизованных систем горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения;
- 4) достижение и соблюдение баланса экономических интересов организаций, осуществляющих горячее водоснабжение, холодное водоснабжение и (или) водоотведение, и их абонентов;
- 5) установление тарифов в сфере водоснабжения и водоотведения исходя из экономически обоснованных расходов организаций, осуществляющих горячее водоснабжение, холодное водоснабжение и (или) водоотведение, необходимых для осуществления водоснабжения и (или) водоотведения;
- 6) обеспечение стабильных и недискриминационных условий для осуществления предпринимательской деятельности в сфере водоснабжения и водоотведения;
- 7) обеспечение равных условий доступа абонентов к водоснабжению и водоотведению;
- 8) открытость деятельности организаций, осуществляющих горячее водоснабжение, холодное водоснабжение и (или) водоотведение, органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления, осуществляющих регулирование в сфере водоснабжения и водоотведения.

На практике, однако, принципы баланса экономических интересов и установления экономически обоснованных тарифов не соблюдаются. Финансовые показатели деятельности показывают, что в целом сфера ВКХ является убыточной (рис. 61).

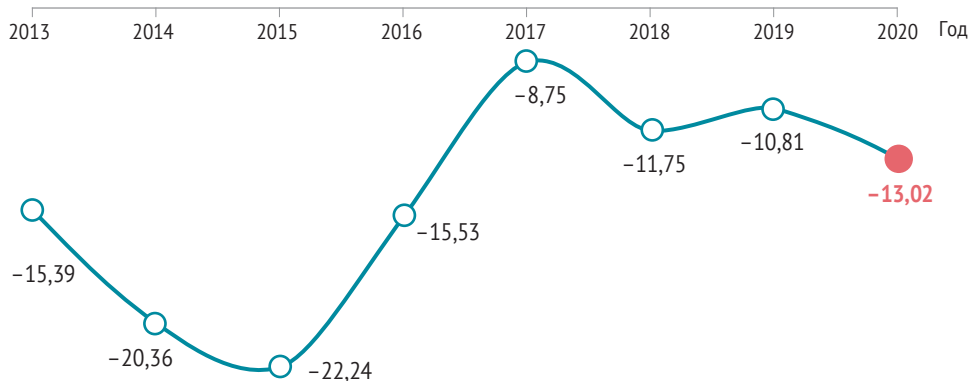


Рис. 61. Финансовый результат от основной деятельности ВКХ, млрд руб.

Соотношение операционных и инвестиционных расходов остается на едином уровне: в интервале 17–20% инвестиционных расходов на 83–80% операционных. На практике процесс тарифообразования в отрасли представляет собой вариации «затратных методов регулирования» (т. е. основывается на определении затрат, необходимых для ведения хозяйственной деятельности регулируемого субъекта), а обоснование необходимых расходов (как операционных, так и инвестиционных) происходит исходя из предельного индекса, а не из баланса «потребность–возможность».

Развитие инфраструктуры ВКХ<sup>83</sup> обеспечивается инвестициями (рис. 62) в среднем в 70,3 млрд руб./год (21% от выручки); при этом софинансирование государства в отрасль (с учетом субсидий и льгот) составляет в среднем 21,5 млрд руб./год (6,6% от выручки) и имеет неравномерный характер: к 2012 г. среднегодовые объемы софинансирования существенно уменьшились, более чем в 2,6 раза, а к 2017 г. увеличились почти в 2 раза.

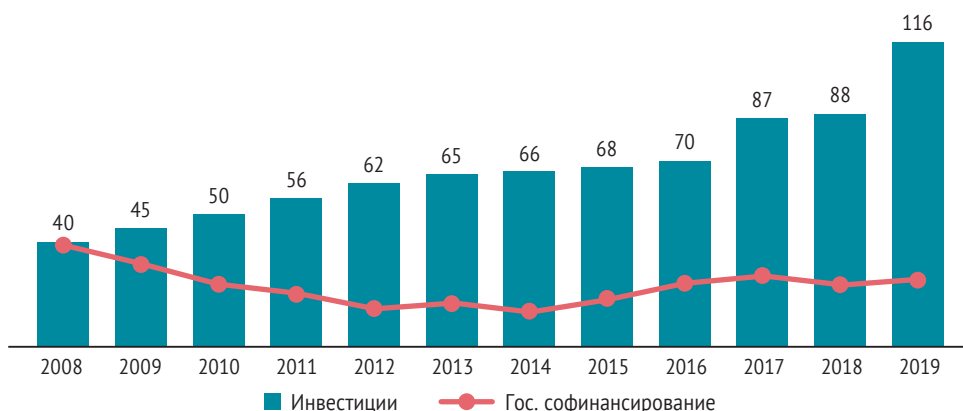


Рис. 62. Динамика капитальных вложений в ВКХ, млрд руб.

При отсутствии достаточной тарифной выручки предприятия вынужденно прибегают к нецелевому расходованию средств, когда заложенные в тариф расходы на оплату приобретенных энергоресурсов, ремонтные работы и прочее идут на покрытие издержек от операционной деятельности, прежде всего заработной платы, и реагенты. Ситуация усугубляется тем, что рост цен на электроэнергию существенно превышает допустимый рост тарифа. При этом рынок банковского кредитования для организаций ВКХ, как правило, намного дороже среднего уровня ввиду отрицательной рентабельности отрасли (-2,54% по водоснабжению и водоотведению). Это приводит к сохранению низкой инвестиционной привлекательности отрасли, маргинализации отношений между регулируемыми организациями и регулирующими органами, а также к невозможности управлять развитием отрасли на основе объективной оценки динамики по целевым показателям.

<sup>83</sup> Добровольный национальный обзор об осуществлении Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. — 2020.



Так, в целом по России для предприятий водопроводно-канализационного хозяйства утверждено 516 инвестиционных программ в сфере водоснабжения. Общий объем средств, предусмотренных инвестиционными программами, согласно информации регионов, составил 134,4 млрд руб., включая 63,0 млрд руб. — собственные средства предприятий, в том числе за счет амортизации — 23,6 млрд руб., и 21,6 млрд руб. — бюджетные средства.

По состоянию на 14 июня 2019 г. в России заключено 42 концессионных соглашения в сфере водоснабжения и водоотведения с суммарным объемом инвестиционных обязательств 195,9 млрд руб. (около 3 млрд дол. США). Среди проектов, реализующихся в России в сфере водоснабжения и водоотведения, 20 проектов — частная инициатива с суммарным объемом инвестиционных обязательств 57,3 млрд руб. (около 880 млн дол. США). Все проекты, реализующиеся в сфере водоснабжения и водоотведения, являются проектами муниципального уровня. Концессионные проекты сферы водоснабжения и водоотведения реализуются в 25 субъектах РФ. Наибольшее количество соглашений заключено в Ростовской области и Ханты-Мансийском автономном округе — по пять соглашений. Наибольший объем инвестиционных обязательств отмечен в Волгоградской области — 58 млрд руб. (около 890 млн дол. США). Этот факт обуславливает критическую значимость государственного финансирования капиталоемких инвестиционных проектов в отрасли.

### **Федеральный проект «Чистая вода»**

Федеральный проект «Чистая вода» реализуется в рамках Государственной программы Российской Федерации «Обеспечение доступным и комфортным жильем и коммунальными услугами граждан Российской Федерации» и Национального проекта «Экология». Цель данного федерального проекта — повышение качества питьевой воды посредством модернизации систем водоснабжения и водоподготовки с использованием перспективных технологий, включая технологии, разработанные организациями оборонно-промышленного комплекса.

Результатами федерального проекта (табл. 32) являются:

- утверждение справочника перспективных технологий водоподготовки с использованием технологий, разработанных организациями оборонно-промышленного комплекса с учетом оценки риска здоровью населения;
- оценка состояния объектов централизованных систем водоснабжения и водоподготовки на предмет соответствия установленным показателям качества и безопасности питьевого водоснабжения;
- утверждение региональных программ субъектов Российской Федерации по строительству и реконструкции (модернизации) объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки;
- обеспечение качественной питьевой водой 95,5% городского населения;
- завершение строительства и реконструкции (модернизации) объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки, предусмотренных региональными программами субъектов Российской Федерации по строительству и реконструкции (модернизации) объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки.

Целевые показатели федерального проекта (нарастающим итогом к 31 декабря 2024 г.) определены следующим образом:

- 90,8 % населения Российской Федерации будет обеспечено качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения;
- 99 % городского населения Российской Федерации будет обеспечено качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения.

В рамках Федерального проекта «Чистая вода» в 2019 г. были достигнуты следующие результаты:

- проведена оценка состояния объектов централизованных систем водоснабжения и водоподготовки на предмет соответствия установленным показателям качества и безопасности питьевого водоснабжения;
- утвержден справочник перспективных технологий водоподготовки с использованием технологий, разработанных организациями оборонно-промышленного комплекса с учетом оценки риска здоровью населения;
- утверждены региональные программы субъектов Российской Федерации по строительству и реконструкции (модернизации) объектов питьевого водоснабжения и водоподготовки;
- утвержден и направлен в субъекты Российской Федерации Порядок контроля за реализацией региональных программ по повышению качества водоснабжения.

Финансовое обеспечение реализации федерального проекта из средств федерального бюджета на период с 2018 по 2024 г. составляет 147,03 млрд руб., финансирование из внебюджетных источников — 85,468 млрд руб.

По состоянию на 2020 г. целевой показатель «доля городского населения, обеспеченного качественной питьевой водой из систем централизованного водоснабжения» достиг 93,2 % при плановом значении в 94,5 %. Соответствующий показатель для населения в целом — 85,5 % при плановом 87,5 %.

Таблица 32. Основные результаты реализации  
Федерального проекта «Чистая вода»

Показатель	Тип показателя	Базовое значение	2018 г.		2019 г.		2020 г.	
			План	Факт	План	Факт	План	Факт
Доля городского населения РФ, обеспеченного качественной питьевой водой из системы централизованного водоснабжения, %	Основной	94,5	94,5	93,2	94,5	93,2	93,4	93,5
Доля населения РФ, обеспеченного качественной питьевой водой из системы централизованного водоснабжения, %	Основной	87,5	87,5	85,6	87,5	85,5	85,8	86,5

### *Водная стратегия Российской Федерации*

Водная стратегия Российской Федерации — основной документ стратегического планирования развития водохозяйственного комплекса. Для определения ключевых направлений деятельности по развитию водохозяйственного комплекса России в 2009 г. распоряжением Правительства Российской Федерации была утверждена Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 г.

В рамках Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г. стратегия была нацелена на водоресурсное обеспечение реализации данной концепции.

Конечные результаты стратегии и финансирование их достижения определены Правительством РФ:

- гарантированное обеспечение водными ресурсами населения и отраслей экономики (168,8 млрд руб.);
- сохранение и восстановление водных объектов до состояния, обеспечивающего экологически благоприятные условия жизни (170,6 млрд руб.);
- обеспечение защищенности от негативного воздействия вод (299 млрд руб.).

Финансовое обеспечение реализации стратегии предусматривалось за счет средств федерального бюджета (480,9 млрд руб.), бюджетов субъектов РФ (114,6 млрд руб.), местных бюджетов и внебюджетных источников (66,9 млрд руб.)<sup>84</sup>.

В части, касающейся сферы водоснабжения и водоотведения, средства федерального бюджета направлялись в том числе на следующее:

- строительство крупных водохозяйственных объектов федерального уровня, имеющих важное социально-экономическое значение, в том числе водохозяйственных объектов для мелиоративных систем;
- обеспечение нормативно-правового регулирования в сфере водных отношений и функций государственного управления;
- проведение научных исследований, разработку технологий, способствующих развитию ВХК.

Стратегия развития ВХК на текущее десятилетие по состоянию на 2021 г. не разработана, но основные проблемы и задачи в этой области сформулированы в государственных докладах<sup>85</sup>.

Сохраняя высокие показатели обеспеченности водными ресурсами, необходимо решить существенные проблемы как регионального, так и местного характера, связанные с обеспечением водными ресурсами сфер экономики. При этом нельзя описать проблему нехватки водных ресурсов, не представляя уровень водоемкости различных видов экономической деятельности.

<sup>84</sup> Сиваев С. Б. Муниципальная тарифная политика // Некоммерческий фонд реструктуризации предприятий и развития финансовых институтов : информационный бюллетень. — 1999. — Вып. VII. — С. 11–18.

<sup>85</sup> Сиваев С. Б. Жилищно-коммунальный комплекс. Между политикой и экономикой : экспертно-аналитический доклад. — М., 2018.

Основной объем водопотребления в 2020 г. приходился на вид экономической деятельности «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха». В 2019 г. он составил 22,11 млрд м<sup>3</sup>, а в 2020 г. данный показатель сократился до 20,15 млрд м<sup>3</sup> (42,9% от общероссийского объема водопотребления). На втором месте оказался вид экономической деятельности «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» со значением 10,93 млрд м<sup>3</sup> в 2018 г. и 9,23 млрд м<sup>3</sup> в 2019 г. Если говорить о динамике, то на забор воды из природных водных объектов хозяйственными единицами, относившимися к виду экономической деятельности «Сельское хозяйство, охота и лесное хозяйство...», в 2005 г. приходилось свыше 18,5 млрд м<sup>3</sup>, в 2010 г. — почти 17,3 млрд м<sup>3</sup>, в 2015 г. — 15,8 млрд м<sup>3</sup> (по всем этим годам — 22–23% от общего объема в целом по стране).

Свежая вода в основном расходуется на промышленные, питьевые и бытовые нужды, орошение и сельскохозяйственное водоснабжение. Основным направлением использования свежей воды является промышленное водоснабжение. В 2020 г. его объем составил 24,68 млрд м<sup>3</sup>,<sup>86</sup> сократившись на 7,3% с 2019 г., когда было зафиксировано 26,62 млрд м<sup>3</sup>. Значение промышленного водопотребления соответствует 52,5% от общего объема потребления свежей воды в стране. Объем использования воды для питьевых и бытовых нужд также сократился в 2020 г. до 7,55 млрд м<sup>3</sup> в сравнении со значением 2019 г. (что соответствует примерно 16% от общего объема по Российской Федерации). Показатель сельскохозяйственного водоснабжения сократился в 2020 г. в сравнении с 2019 г. и был равен 0,29 млрд м<sup>3</sup> и 0,31 млрд м<sup>3</sup> соответственно. Остальной объем воды использовался в прудовом промысле, поливе пастбищ, поддержании пластового давления и ряде других целей. На вид экономической деятельности «Добыча полезных ископаемых» в 2005 г. пришлось 3,1 млрд м<sup>3</sup> водозабора, в 2010 г. — 2,8 млрд м<sup>3</sup>, в 2015 г. — 4,4 млрд м<sup>3</sup>. В 2017 г. по соответствующему виду деятельности рассматриваемый показатель вышел на уровень 6,7 млрд м<sup>3</sup>. Это значение соответствовало в 2005 г. менее 4%, а в последующий период оно повысилось до 6–7% от общефедерального уровня; в 2017 г. указанное значение достигло почти 10%. В 2018 г. абсолютный объем водозабора в данной отрасли сократился до 5,2 млрд м<sup>3</sup>, а относительный объем к общему объему по экономике страны составил менее 8%. В отчетном 2020 г. показатель был равен 4,79 млрд м<sup>3</sup> (7,02%).

На энергетический сектор экономики «Производство, перераспределение и распределение электроэнергии, газа, пара и горячей воды» приходится основная часть забираемой воды. В частности, в 2005 г. водозабор по этой отрасли равнялся 28,6 млрд м<sup>3</sup>, в 2010 г. — 30,2 млрд м<sup>3</sup>, в 2015 г. — 25,9 млрд м<sup>3</sup>. Это составляло порядка 36–38% от общей величины водозабора по России в указанные годы.

<sup>86</sup> Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». — 2019.

В 2017 г. водозабор составил 22,2 млрд м<sup>3</sup> (свыше 32%), а объем оборотного и повторно-последовательного водоснабжения — 78,2 млрд м<sup>3</sup> (56%). В 2018 г. забор воды предприятиями отрасли составлял 24,1 млрд м<sup>3</sup>, или свыше 35% от всего водозабора в России, а оборотное и повторно-последовательное использование воды — 80,7 млрд м<sup>3</sup>, или те же 56%, что и в предшествующем году. В отчетном 2020 г. показатель был равен 19,69 млрд м<sup>3</sup> (34,23%)<sup>87</sup>.

В 2017 г. в соответствии с обновленной версией ОКВЭД в составе рассматриваемых сводных отчетных данных появился собирательный вид экономической деятельности «Водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений», напрямую объединяющий сведения по водопроводам и канализациям коммунального и близкого им характера. Общая величина водозабора из водных источников составила в 2017 г. по хозяйственным объектам этой отрасли 11,6 млрд м<sup>3</sup> (около 17% от общероссийского объема).

Забор воды по предприятиям и организациям, включенным в вид деятельности «Транспорт и связь», в 2010–2016 гг. варьировал в пределах 2,9–3,7 млрд м<sup>3</sup> без четко выраженной тенденции к увеличению или уменьшению.

В 2017 г. показатель водозабора по объектам, отнесенным к виду деятельности «Транспортировка и хранение», составил 3,6 млрд м<sup>3</sup> (5% от общего объема по стране), а в 2018 г. — менее 3,1 млрд м<sup>3</sup> (около 5%).

Как видно из изложенного материала, потребность в водных ресурсах огромного числа предприятий различных видов экономической деятельности в той или иной степени зависит от наличия стабильных водных источников. В этой связи необходимо отметить проблемы, складывающиеся в различных водных бассейнах нашей страны. Основные причины данных проблем — неравномерность распределения водных ресурсов внутри Российской Федерации, их значительная гидрологическая изменчивость, то есть изменение объемов водных ресурсов в зависимости от года (маловодные и полноводные периоды), а также высокая степень их загрязненности и деградации. Усугубляет ситуацию тот факт, что в маловодных регионах зачастую наблюдается высокая многолетняя вариация: фактический объем воды может существенно отличаться от среднегодового показателя. Так, бассейны рек европейской части России — Днепра, Волги, Дона, Кубани, Самура, Сулака, Терека, Урала — в маловодный год могут снижать объем водных ресурсов до 60% от среднегодового значения.

Таким образом, при наличии больших естественных ресурсов поверхностных и подземных вод в России, преобладающая часть которых находится в восточных и северных регионах, экономически развитая европейская территория страны, а также некоторые другие районы с высоким уровнем комплексного освоения водных ресурсов во многом исчерпали возможность устойчивого развития без рационализации водопользования, экономии воды и восстановления качества водной среды.

<sup>87</sup> Там же.

## ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 г., принятая всеми государствами-членами Организации Объединенных Наций в 2015 г., представляет собой общий план обеспечения мира и процветания для людей и планеты в настоящее время и в будущем. В его основе лежат 17 Целей устойчивого развития (ЦУР), которые являются настоящим призывом к действиям всех стран — развитых и развивающихся — в рамках глобального партнерства.

Успешные организация и управление производством питьевой воды — это значимый вклад в достижение четырех целей (рис. 63):

- обеспечение здорового образа жизни и содействие благополучию для всех в любом возрасте;
- обеспечение доступности и устойчивого управления водоснабжением и санитарией для всех;
- создание устойчивой инфраструктуры, содействие инклюзивной и устойчивой индустриализации и стимулирование инноваций;
- сохранение и рациональное использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития.



Рис. 63. Цели устойчивого развития, достижение которых зависит от успешных организации и управления производством питьевой воды

Стратегия развития системы водоснабжения Российской Федерации должна предусматривать следующее:

- использование базы данных наилучших доступных технологий;
- база данных наилучших доступных технологий должна стать «живым» постоянно пополняющимся банком сбора информации об инновационных достижениях в области разработки методов, сооружений, оборудования и материалов, применяемых на станциях водоподготовки;
- изменение концепции выбора технологических решений при выполнении мероприятий модернизации существующих или вновь создаваемых сооружений водоподготовки с использованием фундаментальных основ научного направления «Системный анализ» при сравнении с основными принципами и закономерностями научных и прикладных основ процесса производства питьевой воды;
- разработка и внедрение автоматизированных интеллектуальных систем управления параметрами технологии водоподготовки; использование

измерительно-вычислительных систем, основанных на контроле качества воды по этапам водоподготовки и интеллектуальном управлении исполнительными механизмами; минимизация непроизводственных затрат; снижение влияния человеческого фактора на производственный процесс и качество выпускаемой воды;

- применение технологий замкнутого цикла — политика ресурсосбережения.

Большинство отечественных систем водоснабжения крупных и средних населенных пунктов и промышленных предприятий в последние десятилетия проектировались и создавались, в первую очередь, на базе более доступных водозаборов из открытых водоисточников. В начале массового строительства этих систем не всегда прогнозировалась вероятность относительно быстрого во времени ухудшения качества поверхностных вод, связанного с интенсивным развитием химических, горнодобывающих, металлургических, лесоперерабатывающих и других производств.

Существенный вред качеству природных вод, используемых в системах водоснабжения, нанесла в свое время реализация широкомасштабных планов химизации и мелиорации сельскохозяйственных земель. Отрицательную роль сыграло недостаточное соблюдение природоохранных мероприятий, которые требовалось осуществлять одновременно с использованием гербицидов, пестицидов, сбросом дренажных засоленных стоков с полей орошения, строительством прудов-накопителей. Чрезмерное зарегулирование русел рек на равнинных территориях, сброс в водотоки и водоемы в больших количествах недостаточно очищенных бытовых и промышленных сточных вод, диффузные стоки с полей и городских территорий, чрезвычайные ситуации и аварийные выбросы токсичных элементов (включая радиоактивные) — все это также привело к значительному ухудшению качества вод в источниках хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Лучшей защищенностью от антропогенных загрязнений характеризуются подземные воды. Большое количество из их числа требует предварительного снижения в воде содержания железа, марганца, фтора, агрессивного диоксида углерода, сероводорода, бора, брома, стабильного стронция, солей жесткости и других ингредиентов.

Оценка современного состояния качества воды в водоисточнике и существующих технологий и технических средств очистки природных вод, анализ нормативно-правовой базы в области охраны водных ресурсов и обеспечения населения высококачественной питьевой водой позволяют сформулировать основные стратегические принципы требуемого технического перевооружения систем водоочистки. Их реализация на практике предусматривает:

- системный подход к оценке качества воды на водозаборе с учетом современных антропогенных нагрузок на них (постоянных или периодических) и определение на расчетный период приоритетных видов загрязнений и их определяющих концентраций с учетом временного фактора присутствия их в местах водозаборов, фазово-дисперсного состояния примесей и их агрегативной и кинетической устойчивости;

- выбор и обоснование интенсифицированных и новых технологий и технических средств водоочистки с учетом не только их достаточной санитарно-гигиенической надежности, но и экономного использования дорогостоящего оборудования, реагентов, материалов, обладающих достаточной экологичностью;
- технико-экономическое сравнение на стадиях проектирования и внедрения альтернативных технологий и сооружений при их одинаковой водоочистной способности;
- создание структурных и математических моделей для решения оптимизационных задач как по водоочистным комплексам (станциям) в целом, так и по отдельным блокам и сооружениям водоподготовки;
- разработка и реализация программных средств оперативного управления в оптимальных режимах технологическими процессами на водоочистных станциях при изменяющемся качестве воды, поступающей в «голову» очистных сооружений.

Одной из главных составляющих в общей проблеме получения высококачественной питьевой воды для нужд населения и промышленных предприятий является выбор надежных технологических схем очистки при изменяющихся условиях водозабора из поверхностных и подземных водоисточников и изменении качества исходной воды под воздействием факторов природного и техногенного происхождения.

Разработанный в рамках реализации Федерального проекта «Чистая вода», входящего в Национальный проект «Экология», «Справочник перспективных технологий водоподготовки и очистки воды с использованием технологий, разработанных организациями оборонно-промышленного комплекса и учетом оценки риска здоровью населения» значительно облегчает решение задач, связанных с проектированием новых и реконструкцией существующих станций водоочистки. В справочнике представлена краткая информация, позволяющая обосновать по единому алгоритму выбор перспективных технических и технологических решений, применяемых в проектах мероприятий по реконструкции, модернизации, строительству объектов централизованных систем водоснабжения.

Интенсификация основных процессов водоподготовки на ее различных стадиях в мировой и отечественной практике осуществляется в настоящее время в следующих направлениях.

**Реагентное хозяйство.** В последние годы в России наблюдается тенденция к расширению ассортимента типов коагулянтов, флокулянтов и реагентов для обеззараживания воды. Все большее практическое применение находит оксихлорид алюминия, положительные качества которого были установлены еще более 40 лет тому назад. Сочетание различных вариантов их применения, мест ввода в соответствии с сезонным изменением устойчивости коллоидов в природных водах и появлением в них специфических загрязняющих веществ позволяет во многих случаях достигать более глубокого извлечения трудно-окисляемых и высокодисперсных примесей на последующих стадиях обработки, сокращать продолжительность хлопьеобразования, исключать повышенное содержание остаточного алюминия в очищенной воде.



Интенсификация<sup>88</sup> процессов смешения растворов реагентов с исходной водой и хлопьеобразования достигается путем внедрения лопастных механических мешалок с регулируемым приводом вращения лопастей, трубных смесителей мгновенного действия, камер хлопьеобразования с контактной зернистой средой с плотностью зерен больше и меньше плотности воды, с псевдооживленным зернистым слоем из легких полимерных материалов.

Аэрирование цветных маломутных вод, содержащих органические вещества природного и техногенного происхождения, и их предварительная флотация также могут привести к существенной экономии коагулянтов и флокулянтов за счет снижения их необходимых доз перед контактным фильтрованием.

**Придание водозаборным устройствам и сооружениям** более значимых водоочистных функций является также весьма перспективным направлением повышения экономичности работы традиционных станций водоочистки.

Интенсификация процессов отстаивания и осветления поверхностных вод в слоях со взвешенным осадком достигается применением отстойников со встроенными камерами хлопьеобразования (рис. 64), с дискретным отбором осадка по длине сооружений, с перекрестной или обратной схемой тонкослойного отстаивания, с рециркуляцией части осадка в зоне его накопления и осветления воды.

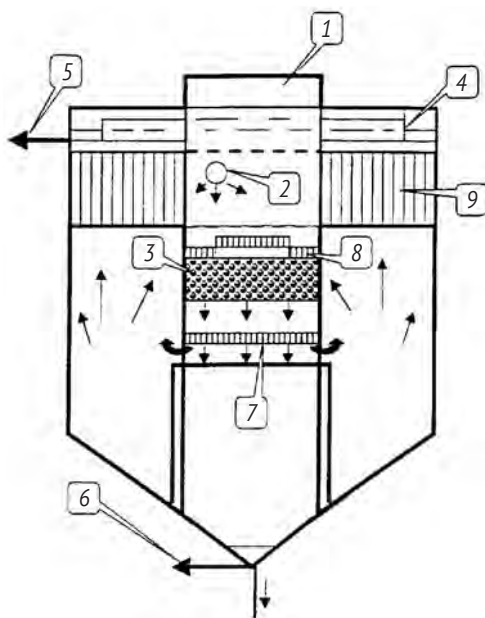


Рис. 64. Схема вертикального тонкослойного отстойника с контактной камерой хлопьеобразования:

1 — камера хлопьеобразования; 2 — подача исходной воды; 3 — контактная плавающая загрузка; 4 — сборный лоток; 5 — отвод осветленной воды; 6 — сбор осадка; 7, 8 — нижняя и верхняя поддерживающие решетки; 9 — тонкослойные сотоблоки

<sup>88</sup> Интенсификация — процесс и организация развития производства, в котором применяются наиболее эффективные средства производства, а также расширение производства.

Для высокомутных вод эффективно использование первичного отстаивания в модернизированных отстойниках. Одним из необходимых условий эффективности работы отстойных сооружений, особенно при отстаивании больших объемов высокомутных речных вод, обработанных предварительно реагентами, является своевременное и качественное удаление осадка из зоны его накопления и уплотнения при больших площадях промышленных отстойников.

Традиционно **интенсификация процессов фильтрации** малоконцентрированных суспензий, образующихся после реагентной обработки и отстаивания с мутностью до 20–50 мг/л и цветностью до 50–150 градусов, осуществляется путем применения фильтрующих материалов с большой удельной поверхностью зерен, с периодическим и дискретным вводом поочередно коагулянтов и флокулянтов перед слоями крупногранулированной загрузки, с усовершенствованием технологических процессов водо-воздушных промывок фильтрующих загрузок.

При фильтрации полидисперсных примесей, с их содержанием более 100–150 мг/л, рациональным является применение комбинированных многослойных фильтровальных сооружений с фильтрованием в направлении уменьшения крупности гранул и с регулируемым межпоровым пространством гранульно-волокнуистой плавающей загрузки.

К сожалению, из-за определенной сложности с финансированием, инертности служб эксплуатации, недостаточной технико-экономической базы предприятий водопроводного хозяйства многие результаты научных достижений в этой области внедряются в практику медленно и в недостаточном объеме.

**Увеличение антропогенных нагрузок** на водоисточники обусловило необходимость решать на водоочистных станциях не только задачи по удалению взвешенных веществ, цветности, водорослей, но и нефтепродуктов, фенолов, ПАВ, солей тяжелых металлов, азотных соединений. Решение этих задач осуществляется в ряде случаев дополнением традиционных технологий озонированием в несколько ступеней и сорбцией на активированных углях. По такому пути идут последние три-четыре десятилетия специалисты стран Западной Европы и США. В последние годы интенсифицировались эти работы и в России.

Частичная замена озонирования совместной комбинированной обработкой воды ультразвуком с ультрафиолетом возможна лишь в узкой области, ограниченной качественными показателями исходной воды и экономическими факторами.

**Интенсификация и повышение безопасности систем** обеззараживания воды осуществляется путем более широкого применения вместо традиционного хлора растворов гипохлорита натрия, полученных химическим и электрохимическим путем, УФ-облучения и его комбинаций с озонированием и ультразвуком; более совершенных устройств и приборов для дозирования обеззараживающих агентов в очищенную исходную воду; более надежных способов транспортировки, хранения и разлива жидкого хлора на станциях большой производительности. К сожалению, из-за недостаточной бактериальной чистоты водопроводных сетей отказаться от хлорирования на заключительной стадии обработки воды в существующих системах (за исключением небольших систем)

пока не представляется возможным. Однако значительно уменьшить дозы хлора, в том числе и благодаря оптимизации режимов и мест ввода реагента во всей системе распределения и подачи воды, — вполне осуществимая задача.

Особое место занимает проблема эксплуатации водоочистных станций в аварийных ситуациях, например, при опасном загрязнении воды в местах водоисточников, расположенных выше водозаборов. Эта проблема приобретает особую остроту, когда объект водоснабжения не имеет резервного подземного или поверхностного водоисточника. В этом случае заслуживает внимания создание в районе действующих водозаборов и водоочистных станций регулируемых (иногда аэрируемых) специальных водохранилищ (водоемов) с периодическим водообменом, обеспечивающих 20–30-суточный запас воды для нормального снабжения водой объекта водоснабжения. В этот период забор воды из загрязненного водоисточника не производится. В нормальном режиме эксплуатации такой водоем может служить нейтрализатором токсичного воздействия перехлорирования или вынужденного ввода больших доз коагулянтов на первой стадии водообработки.

В современной практике очистки подземных вод наибольшее применение находят методы обезжелезивания (рис. 65) подземных вод упрощенным или усиленным насыщением воды кислородом воздуха для окисления двухвалентных форм железа в трехвалентные с последующим фильтрованием через зернистую среду.

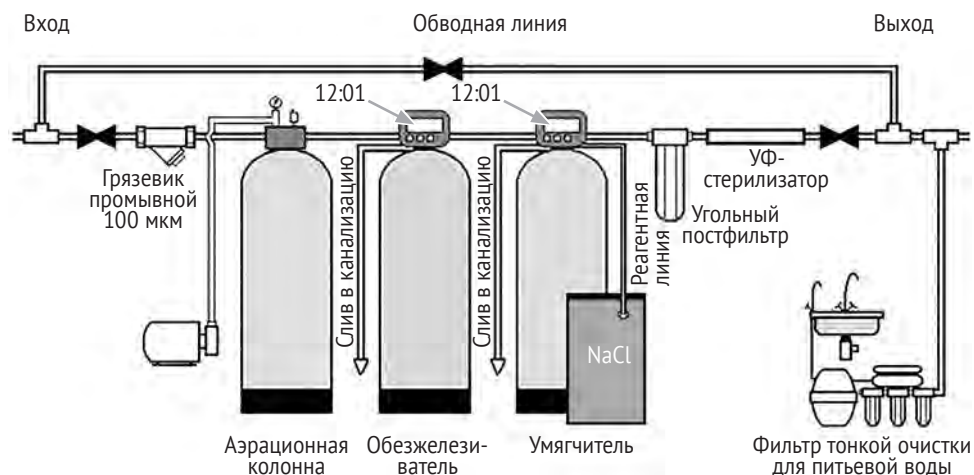


Рис. 65. Принципиальная схема очистки воды с обезжелезиванием и умягчением

Области применения других методов (усиленная вакуумно-эжекционная обработка, известкование, катионирование, обработка сильными окислителями типа  $O_3$ ,  $KMnO_4$  и др.) с последующим отстаиванием и фильтрованием зависят от содержания железа в карбонатной, бикарбонатной или сернокислой форме, марганца, от щелочности, pH, окисляемости, присутствия в воде  $CO_2$  и  $H_2S$ . В последние годы в лаборатории очистки природных вод и инженерных сооружений водоподготовки НИИ ВОДГЕО разрабатываются и внедряются методы,

основанные на применении на первой ступени биореакторов-окислителей, комбинированного воздействия ультразвука и ультрафиолета, известкования с последующим отстаиванием и контактным фильтрованием через неоднородную полимерную загрузку с ее гидроавтоматической промывкой. Для небольших производительностей в лаборатории улучшения качества воды разработаны и внедрены мембранные технологии и установки.

При отсутствии альтернативы подземным источником с жесткой и соленовой водой подготовка вод питьевого качества может осуществляться известными в промышленном водоснабжении методами ионного обмена, ультрафильтрации и обратного осмоса.

Одна из острых, недостаточно решенных задач технологического, экономического и экологического плана при использовании ионообменных методов умягчения и обессоливания природных вод — регенерация и утилизация промывных рассолов. Для мембранной технологии сдерживающим фактором более широкого внедрения крупномасштабных станций кондиционирования жестких, соленых вод ( $Q > 5-10$  тыс. м<sup>3</sup>/сут) на ее основе являются весьма существенные капитальные затраты, образование до 30% концентрированных рассолов и значительные расходы на их дальнейшую регенерацию (очистку) и повторное использование.

Не менее важным фактором для улучшения общего состояния отечественных систем водоподготовки является строительство новых и реконструкция существующих станций очистки.

Отметим еще одну значимую составляющую в перспективе развития данной отрасли. Это подготовка инженерных кадров и специалистов высшей квалификации. Невостребованность в настоящее время преобладающего числа выпускников вузов по специальности «Водоснабжение и водоотведение», застой в развитии экспериментальной базы научно-исследовательских лабораторий многих вузов и НИИ, сложная экономическая ситуация в сфере подготовки высококлассных специалистов отрасли — острейшие социальные проблемы, угроза будущему нашей науки и отрасли. Без решения этих проблем противостоять засилью зарубежных (иногда недостаточно апробированных) технологий и вытеснению отечественных производителей водоочистного оборудования, технологий и приборов с государственного потребительского рынка будет весьма сложно.

### *Современные решения в области технологии водоподготовки*

Снабжение населения качественной питьевой водой в больших городах представляет серьезную научную и практическую задачу. С одной стороны, ужесточаются требования к качеству питьевой воды, подаваемой в системы централизованного водоснабжения. С другой стороны, существующие технологии не всегда могут справляться с поставленной задачей в силу различных причин. Сюда можно отнести колебания качества природной и очищенной воды в силу природных (паводок), экологических или технологических (аварии) факторов, а также состояния водопроводных сетей.

*Безреагентные технологии*

**Мембранные методы.** Все большее внимание в настоящее время уделяется поиску перспективных, новых, более компактных, дешевых, простых в эксплуатации методов очистки воды. К числу таких методов подготовки питьевой воды относятся мембранные методы: ультрафильтрация и нанофильтрация. Различия в методах заключаются в уровне очистки воды. Ультрафильтрационные мембраны, имеющие размеры пор от 0,002 до 0,1 мкм, могут задерживать высокомолекулярные органические вещества (гуминовые и фульвокислоты), взвешенные и коллоидные вещества (например, коллоиды гидроокиси железа), бактерии и вирусы. Нанофильтрационные (или обратноосмотические) мембраны, имеющие размер пор, соизмеримый с размерами молекул воды, эффективно снижают содержание растворенных в воде органических и неорганических веществ: солей жесткости, железа, стронция, фторидов, тяжелых металлов, хлорорганических веществ.

Внешне оба процесса имеют сходное аппаратное оформление: мембранные аппараты рулонного типа унифицированных размеров, насосные агрегаты, обвязка трубопроводами из полиэтилена или полипропилена, сходные элементы автоматизации. Однако имеются принципиальные различия. Если при эксплуатации нанофильтрационных установок накопившиеся в процессе работы на поверхности мембран осадки задержанных из воды загрязнений удаляются с помощью химических промывок (т. е. с применением реагентов), то при эксплуатации ультрафильтрационных мембран удаление загрязнений с поверхности мембран производится «обратным током», как у фильтров с зернистой загрузкой. Поэтому безреагентная технология ультрафильтрации считается за рубежом технологией будущего.

Хотя вода Московского водопровода вполне пригодна для питья, в силу перечисленных выше обстоятельств в воду могут попадать хлорорганические соединения, бактерии и вирусы. В мировой практике накоплен опыт разработки и применения различных технологий улучшения качества воды, подаваемой в водопроводную сеть. Однако сейчас все большее предпочтение отдается мембранным методам с надеждой на применение в будущем ввиду их невысокой стоимости, компактности, простоты обслуживания.

В Париже, ряде городов США, Швеции, Голландии имеется опыт строительства крупных мембранных установок улучшения качества воды производительностью от 2000 до 10 000 м<sup>3</sup>/ч. После «классических» очистных сооружений воду пропускают через мембраны, в результате гарантируется ее чистота от болезнетворных бактерий, вирусов и ряда растворенных хлорорганических соединений. В настоящее время ведутся работы по созданию мембранной станции на московских очистных сооружениях.

Важный аспект проблемы городского водоснабжения — состояние городских водопроводных сетей, вызывающее дополнительное загрязнение воды. В мировой и европейской практике начинает широко использоваться доочистка воды, поступающей из городского водопровода. Применяются мембранные системы и в домашнем «водоснабжении». Это многочисленные системы «у крана», системы подготовки питьевой воды в столовых, ресторанах, больницах и т. д.

Многие объекты имеют повышенные требования к составу водопроводной воды по жесткости, содержанию железа, бактерий, взвешенных частиц. Это медицинские оздоровительные центры, элитные клубы здоровья, элитные жилые дома, офисные здания. Для таких объектов используются автономные системы водоснабжения, гарантирующие постоянно высокое качество воды вне зависимости от паводков и других причин сбоя в работе городских очистных сооружений.

Более того, плохое качество централизованной горячей воды и перебои с ее подачей заставляют создавать в домах и квартирах автономные системы горячего водоснабжения, которые также должны «питаться» очищенной и умягченной водой. В таких системах применение мембранных установок дает несомненный эффект.

Мембраны пропускают преимущественно молекулы воды, задерживая все загрязнения, молекулы которых больше молекул воды. Также мембраны могут быть использованы при любом составе исходной воды. Следовательно, мембраны являются эффективным, универсальным решением проблемы очистки воды. Однако и среди мембран имеются различия, и для разных типов воды предназначены различные мембраны, обеспечивающие максимально точное соответствие качества очищенной воды предъявляемым к нему требованиям.

Вода из Московского водопровода, а также многих других водопроводов — Владимирского, Нижегородского, Тульского, Рязанского и других — получается при очистке речной воды (поверхностной). Такие воды обычно по солевому составу соответствуют требованиям ГОСТ и ВОЗ, но по содержанию органических веществ имеют проблемы «проскоков». Поэтому для очистки воды рекомендуется использовать нанофильтрационные мембраны, которые удаляют органические вещества и лишь частично задерживают растворенные ионы солей, мало изменяя ионный состав.

Выбор типа мембран зависит от требований к качеству очищенной воды и вида загрязнений в водопроводной воде. Но во всех случаях при подборе мембран для домашней системы очистки воды нужны рекомендации специалистов.

В настоящее время домашние мембранные мини-системы достаточно популярны, и их часто можно увидеть в продаже. Традиционно они состоят из мембранного фильтра, напорного бака-накопителя чистой воды, содержащего запас чистой воды на 5–8 л, а также крана чистой воды. Установка такой мини-станции чистой воды в доме или в офисе приоритетнее, чем покупка бутилированной воды как по качеству, так и по экономическим соображениям. Себестоимость такой воды составляет порядка 1 дол. США за 1 м<sup>3</sup>, т. е. примерно в 300 раз дешевле бутилированной!

Бутилированная вода — это, прежде всего, хорошо очищенная вода, и, как мы выяснили, очищенная в большинстве случаев с помощью мембран. Именно мембраны обеспечивают очистку от растворенных органических веществ, что позволяет воде еще долго храниться. Наряду с фирмами, обеспечивающими надлежащую очистку воды перед ее розливом, имеют место случаи подделок, некачественной очистки и даже использования просто воды из-под крана. Ввиду этого использовать свою проверенную систему гораздо надежнее.

Несмотря на высокую эффективность мембран, не все специалисты согласны с положительной оценкой их использования. Так, гигиенисты считают, что мембраны, а именно обратный осмос, «слишком хорошо» очищают воду, удаляя из нее все соли и необходимые для жизни компоненты: кальций, натрий, фтор и т. д. Действительно, есть мембраны, которые удаляют из воды все соли на 99 %, но есть и другие мембраны, удаляющие соли на 50 % (в 2 раза), а органические вещества — на 90–100 %. Именно их и нужно использовать при очистке, в частности, московской водопроводной воды. Ведь существуют нормативы качества воды: ГОСТ, ВОЗ, СанПиН, и достаточно сделать анализ воды и сравнить. Сложность заключается еще и в том, что гигиенисты предлагают учитывать в нормативах на состав питьевой воды так называемый «нижний порог» на содержание некоторых компонентов воды, например, жесткость воды (содержание в ней кальция и магния) должна быть выше 7 единиц и ниже 2. А при применении мембран концентрации всех компонентов, в том числе жесткость, обычно снижаются. Если, конечно, специально не задаться этой целью и не подбирать соответствующие мембраны.

Вместе с тем существуют жалобы на жесткость воды даже при покупке бутилированной воды, используемой, как правило, для приготовления пищи, чая, кофе. Естественное недовольство вызывает образующаяся при кипении воды накипь или белый налет на поверхности воды в чайниках.

Важным аспектом снабжения населения водой является использование артезианских вод. Эта проблема особенно актуальна для городского строительства в Московской области, где в ряде городов и поселков помимо жесткости и железа подземные воды содержат в повышенных концентрациях фториды, стронций, даже радионуклиды.

В зависимости от качества исходной воды для ее очистки может быть выбран метод ультрафильтрации (только для удаления железа) или метод нанофильтрации обратного осмоса для одновременного снижения жесткости, содержания железа, фторидов, стронция и др. В соответствии с составом исходной воды наиболее оптимальное качество очищенной воды достигается на основании компьютерного оптимизационного расчета с помощью специально созданной компьютерной программы.

Мембранные нанофильтрационные системы малой производительности (от 20 до 1000 л/сут) особенно эффективны при их использовании в квартирах, на дачах, в офисах, пищеблоках предприятий, больниц, баз отдыха и т. д.

В отличие от систем, используемых для улучшения качества московской водопроводной воды, при очистке артезианской воды подбирается наиболее подходящий тип мембраны, а также оптимизируется состав очищенной воды путем подбора значений рабочего давления, выхода фильтрата и т. д. При запахе сероводорода в исходной воде используется специальный фильтр доочистки с окислительной загрузкой, а при повышенной жесткости исходной воды — ингибиторный патрон.

Станции обезжелезивания воды для микрорайонов и отдельных зданий не всегда удовлетворительно работают, поскольку давно требуют реконструкции. Поэтому использование мембранных установок для водоснабжения

многоквартирных домов или новых микрорайонов может оказаться очень эффективным и может избавить от опасности подачи потребителям некачественной воды.

Особое внимание в настоящее время уделяется более широкому использованию отечественных разработок и снижению себестоимости процесса очистки воды. Разработаны отечественные полимерные мембраны (для нанофильтрации и ультрафильтрации) и аппараты на их основе, не уступающие лучшим мировым образцам как по эффективности очистки воды, так и по эксплуатационным свойствам (стойкость к химическим промывкам, возможность гидравлических обратных промывок и т. д.).

Ультрафильтрационные мембраны позволяют создать новый безреагентный метод обезжелезивания воды, по эффективности, компактности и стоимости конкурентоспособный с традиционными методами. Однако для эффективного ведения процесса обезжелезивания необходимо правильно подбирать режимы обратных промывок — удаления накопленных на мембранах загрязнений.

Современные ультрафильтрационные мембраны, имеющие размер пор на уровне 0,05–0,20 мкм, задерживают содержащиеся в природной воде органические вещества, образующие цветность, поэтому их применение дает возможность предложить для очистки поверхностных вод безреагентные технологии, исключая коагулирование, отстаивание, фильтрование. Перспективной также представляется комбинация процессов ультрафильтрации и нанофильтрации, позволяющая управлять ионным составом очищенной питьевой воды.

В современном благоустроенном доме водоочистная установка стала таким же необходимым атрибутом, как, например, бойлер. Беспокойство у домовладельцев вызывает в основном состояние дорогих приборов (сантехника, посудомоечные и стиральные машины, бойлеры), которые могут выйти из строя при плохом качестве воды.

Существует два основных вида загрязнений: железо, дающее красноту воды и оставляющее красные подтеки на сантехнических приборах, и жесткость (кальций), оставляющая накипь на нагревательных приборах. В связи с этим наиболее важно выбрать систему, наиболее подходящую для дома. Критерий выбора любой системы обычно экономический. Можно с уверенностью сказать, что прогресс в области водоочистных устройств идет не столько в направлении улучшения качества очистки, сколько в направлении снижения стоимости очистки. Следовательно, если допустить, что все установки одинаково эффективны, то необходимо определить, насколько долго продолжается эффективная работа и какие затраты потребуются на то, чтобы «регенерировать» фильтр, т. е. провести эксплуатационные мероприятия для «поддержания» эффективности. Расчеты следующие. Контракт на покупку системы воды может составлять от 1500 до 5000 дол. США. Стоимость сервисного обслуживания у разных фирм колеблется от 200 до 500 дол. США в год. Один коттедж потребляет в среднем 300 м<sup>3</sup> чистой воды в год. Таким образом, при сроке службы установки 5 лет стоимость 1 м<sup>3</sup> чистой воды составляет от 1,6 до 4,5 дол. США. Такой расчет следует сделать при выборе установки, попросив фирму-продавца предоставить данные о стоимости контракта на монтаж и пуск установки, стоимости



обслуживания и потребляемых реагентов. Кроме того, нет ни одной системы, которая бы не ломалась и не давала бы сбои, поэтому именно качество сервиса определяет качество установки.

Мембранные установки очистки вод от загрязнений универсальны. Они очень эффективны при использовании в частных домах. «Сердцем» таких установок являются сменные мембранные блоки, заменяемые 1–3 раза в год. Мембраны одновременно снижают содержание в воде железа и жесткость, причем универсально, вне зависимости от состава исходной воды. Поэтому на всех объектах Подмоскovie используются одинаковые взаимозаменяемые блоки. Такие блочно-модульные системы снабжают питьевой водой сотни объектов: от квартир, офисов и коттеджей до домов отдыха, таунхаусов и целых поселков. Стоимость такой системы для одного частного дома водопотреблением порядка 1 м<sup>3</sup>/сут составляет 1600–1800 дол. США, а стоимость ее годового сервисного обслуживания — от 100 до 200 дол. США.

Теперь можно подсчитать себестоимость очистки воды на основе этой технологии, учитывая, что никаких реагентов покупать не надо. Для сравнения: за 4-месячный период эксплуатации стандартный умягчитель потребляет 80–120 кг соли, а стандартный обезжелезиватель — 7–10 кг марганцовки. В зависимости от назначения и объемов потребления чистой воды для снижения стоимости мембранные установки могут быть использованы в виде сплит-систем в различных комплектациях: на весь дом, только для производства питьевой воды, для питьевой воды и стиральной машины и т. д.

**Технология «Аэромаг».** Безреагентная технология очистки воды «Аэромаг» основана на природном эффекте самоочистки воды в высоких водопадах (более 50 м). В каплях воды, падающих с большой высоты и ударяющихся о камни, происходит активное взаимодействие с кислородом воздуха в сочетании с кавитационными процессами, возникающими при ударе капли о препятствие. Сочетание окислительных процессов и кавитации позволяет достичь высокой интенсивности воздействия на загрязнения в воде, прежде всего на ионы железа.

Модули «Аэромаг» предназначены для безреагентной и реагентной очистки питьевой воды подземных и поверхностных водоисточников по следующей схеме: ГА (глубокая аэрация) — ПД (пенная дегазация) — Ф (фильтрация на самопромывном фильтре с плавающей загрузкой) — С (стабилизационная обработка воды отстаиванием в РЧВ) — Обз (обеззараживание УФ-установками либо дозированием гипохлорита натрия).

Обрабатываемая вода поступает в специальную коноидальную форсунку реактора ФОРТ (физический реактор окисления трассирующий), создающую ламинарную высокоскоростную струю (до 35–50 м/с), в которую, используя создаваемое глубокое разрежение (до –98 кПа), внедряется газообразный кислород воздуха.

Далее в потоке происходит продольная трассировка струи на отдельные капли. Каждая капля воды в конце траектории ударяется в специальную жесткую резонансную мишень. При встрече с мишенью из области контакта капли

с мишенью как бы выдавливается водяной диск практически параллельно этой мишени со скоростью истекания воды в нем уже более 350 м/с<sup>89</sup>. В кольцевой области контакта капли и мишени, где формируется этот водяной диск, образуется кавитационный обруч, который на огромной скорости начинает движение в тыльную область капли, и при его смыкании на еще не разрушенной капле происходит кавитационный взрыв. Это приводит к определенному виду суперкавитации, к кипению воды, дегазации, массовым реакциям окисления и перекрестным реакциям между освободившимися от гидратных оболочек ионами. Процессы кавитации в присутствии растворенного кислорода воздуха активизируют на порядок все процессы окисления как тяжелых металлов, так и других загрязнений воды. Вода подвергается сверхсильному физическому воздействию, которое создается при относительно небольшом давлении воды, подаваемой на очистку, — около 4 атм.

Окисление происходит буквально в доли секунды. При этом процессе также используются ионы окислителей, находящихся в воде (фтор, хлор и др.). Это позволяет получать нерастворимые соединения широкого спектра, далее выпадающие в осадок. Их можно через определенное время изъять из воды простым гравитационным отстаиванием. Одновременно с этим происходит процесс дегазации воды, и все газы, в том числе и неиспользованный кислород, удаляются в атмосферу при низкотемпературном кипении.

Фильтрация воды производится на фильтре с плавающей самопрессующейся загрузкой, с использованием гидроробота самопромывки. Гидроробот, в свою очередь, использует вакуум реактора ФОРТ и инициирует промывку не по времени, а по факту, когда фильтр имеет достаточное загрязнение и, соответственно, высокое сопротивление потоку воды. За счет этого объем промывной воды составляет не более 0,5–0,7 % от объема очищенной воды (для сравнения — обычные фильтры требуют для промывки 3–5 % воды в лучшем случае).

Применение модулей «Аэромаг» с большей эффективностью возможно с использованием блоков «НЕЙРУС», на основе инновационных микропроцессорных технологий формирования сложных высокоскоростных электрических полей звукового и ультразвукового диапазона, с генерацией ультразвука вдоль потока воды в трубе. Вода подвергается воздействию продольных импульсов сильного электрического поля со скоростью нарастания поля не менее 5 МВ/нс. Фронты импульсов проникают в воду через емкость двух последовательных электролитических конденсаторов, в которых электролитом служит вода в трубе. Локально, в зоне установки навивных изолированных электродов, наводятся токи смещения. При этом диполи молекул воды совершают колебания в широком спектре звуковых и ультразвуковых частот, стремясь к ориентации вдоль изменяющихся силовых линий электрического поля. Происходит временное разрушение гидратных оболочек ионов. Формируются зародыши кристаллов загрязнений воды в нерастворимых формах, и, уже за реактором ФОРТ, под действием коагулянтов или флокулянтов происходит их укрупнение

<sup>89</sup> Чижов А. В., Шмидт А. А. Высокоскоростной удар капли. — СПб., 2000.

в флоккулы, которые либо осаждаются, либо фильтруются. В любом случае они удаляются при самопромывке фильтра.

Полученные результаты свидетельствуют, что при комплексном использовании модулей «Аэромаг», микропроцессорных модулей генерации «НЕЙРУС» и введении в реакторы ФОРТ коагулянтов или флокулянтов, например, полихлорида алюминия, можно получить снижение до нормативных требований многих загрязнений воды. В безреагентном режиме: снижение общего железа с уровня более чем 25 мг/л до уровня менее 0,05 мг/л, сероводорода — с уровня 3 мг/л, других растворенных газов. При использовании блоков «НЕЙРУС» и дозированием коагулянтов: снижение жесткости с уровня до 11 мг/л<sub>экв</sub>, деманганации с уровня до 1,6 мг/л, соединений фтора с уровня до 2,4 мг/л, цветности с уровня до 70 градусов, с уменьшением в разы расхода коагулянта и содержания остаточного алюминия в очищенной воде. При дозировании гипохлорита натрия перед реактором ФОРТ получено снижение аммиака с уровня в 2,5 мг/л.

При совместном использовании после модулей «Аэромаг» и блоков «НЕЙРУС» системы обратного осмоса можно обеспечить высокую эффективность обратного осмоса без применения антискалантов и других химических реагентов. Кольматация мембран резко снижается. При этом концентрат обратного осмоса обрабатывается также реагентными модулями «Аэромаг» с дозированием коагулянтов (учитывая большую кинетическую энергию воды с обратноосмотическим давлением выше 10 атм).

Возможно создание надежно работающей «Системы нулевого сброса» с использованием эффекта гравитационного отстаивания промывной воды, обработанной модулями «Аэромаг» (рис. 66), с возвратом осветленной промывной воды в «голову» системы водоподготовки и периодическим удалением осадка 5-го класса опасности (неопасный) из отстойников (раз в полгода).



Рис. 66. Внешний вид установки водоподготовки с использованием технологии «Аэромаг»

Производственная линейка «Аэромаг» представлена в виде модулей заводского изготовления, производительностью 50, 100, 170, 340, 500 и 670 м<sup>3</sup>/сут, исходя из наличия реакторов ФОРТ на 2 и 7 м<sup>3</sup>/ч.

Есть опыт создания систем водоподготовки с использованием технологии «Аэромаг» производительностью до 100 000 м<sup>3</sup>/сут и более.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Альбедиль М. Ф.* Забытая цивилизация в долине Инда / М. Ф. Альбедиль. — Санкт-Петербург : Наука, 1991. — 176 с.
2. *Астахова С. А.* Обеззараживание воды высокочастотным ультразвуком в присутствии пероксида водорода / С. А. Астахова // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. — 2013. — №. 3. — С. 71–74.
3. *Афанасьева Т. В.* Питьевая вода как среда обитания патогенных энтеровирусов и актуальные проблемы ее вирусного загрязнения / Т. В. Афанасьева, З. Ф. Богущ, Н. В. Поклонская. — Москва, 2006. — 946 с.
4. *Батарова Н. А.* Бактерицидные, вирулицидные и спороцидные свойства перекиси водорода и возможности практического ее применения для обеззараживания воды : автореф. дис. ... канд. мед. наук / Н. А. Батарова ; Ленингр. сан.-гигиен. мед. ин-т. — Ленинград, 1965. — 15 с.
5. *Бойко В. П.* Очерки истории водоснабжения и водоотведения (теоретический, практический и социокультурный аспекты) / В. П. Бойко, Е. Ю. Осипова, А. Ф. Рехтин, О. А. Сутягина, А. И. Кармалов ; под ред. В. П. Бойко. — Томск: Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. — 164 с.
6. *Бродель Ф.* Структуры повседневности: возможное и невозможное : [пер. с фр.]. — Т. 1: Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV–XVIII вв. / Ф. Бродель. — Москва : Прогресс, 1986. — 622 с.
7. Водоснабжение Санкт-Петербурга / ред.-сост. А. П. Авсюкевич, Ф. В. Кармазинов, И. М. Алексеев, М. И. Алексеев и др. — Санкт-Петербург : Новый журнал, 2003. — 687 с.
8. Восточная в интерьере эпохи : книга очерков / ред.-сост. А. М. Пономаренко, Е. В. Шушкевич, С. А. Алексеенков, Ю. С. Дмитриева и др. — Москва : Современная Полиграфия, 2017. — 112 с.
9. *Гиляровский В. А.* Москва и москвичи / В. А. Гиляровский. — Москва : АСТ, 2018. — 482 с.
10. *Говорова Ж. М.* Обоснование применения аммонизации природной воды, содержащей органические вещества / Ж. М. Говорова, У. С. Рудич, В. О. Говоров // Системные технологии. — 2020. — № 1(34). — С. 17–20.
11. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». — 2019. — 289 с.
12. *Данилина Л. И.* Чистой воды правда: опыт создания систем водоснабжения на территории Волгоградской области / Л. И. Данилина, Ю. А. Кузьмичев ; МУП «Волгоградводоканал». — 2000. — 195 с.
13. *Данилов-Данильян В. И.* Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты / В. И. Данилов-Данильян, К. С. Лосев ; Рос. акад. наук, Ин-т вод. проблем. — Москва ; Санкт-Петербург : Наука, 2006. — 218 с.
14. *Данилов-Данильян В. И.* Экологическая безопасность = Ecological safety: общие принципы и российский аспект : учеб. пособие / В. И. Данилов-Данильян, М. Ч. Залиханов, К. С. Лосев. — 2-е изд., дораб. — Москва : МППА БИМПА, 2007. — 286 с.

15. Добровольный национальный обзор об осуществлении Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. — 2020. — 240 с.
16. *Добромиров В. Н.* Технология обеззараживания жидкостей на основе электрогидравлического эффекта / В. Н. Добромиров, Д. В. Аврамов, Н. В. Мартынов // Вода и экология: проблемы и решения. — 2019. — № 2(78). — С. 17–23.
17. *Журба М. Г.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : учеб. пособие : в 3 ч. — Ч. 2: Очистка и кондиционирование природных вод / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова и др. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2003. — 288 с.
18. *Кнаббе Г. С.* Древний Рим — история и повседневность / Г. С. Кнаббе. — Москва : Искусство, 1986. — 204 с.
19. *Кожин В. Ф.* Установки для озонирования воды / В. Ф. Кожин. — Москва : Стройиздат, 1968. — 171 с.
20. *Кожин В. Ф.* Озонирование воды / В. Ф. Кожин, И. В. Кожин. — Москва : Стройиздат, 1974. — 160 с. : ил.
21. *Колесников В. А.* Оборудование, технологии и проектирование систем очистки сточных вод / В. А. Колесников, Н. В. Меньшутина, А. В. Десятов. — Москва : ДеЛи плюс, 2016. — 289 с.
22. *Кулагин С. М.* Устойчивость возбудителя Ку-лихорадки к некоторым физическим и химическим агентам / С. М. Кулагин, Н. Ф. Соколова, Н. И. Федорова // ЖМЭИ. — 1956. — № 7. — С. 28–32.
23. *Лебедев Н. М.* Испытание комбинированного способа ультрафиолетового и ультразвукового обеззараживания сточных вод / Н. М. Лебедев, В. А. Грачев, О. В. Плямина, О. Ю. Лебедев, Д. С. Лукичёва, В. А. Доильницын, А. А. Акатов, Л. В. Леонов // Экология и промышленность России. — 2019. — № 7(23). — С. 26–30.
24. *Линд Г.* Вода и город / Г. Линд. — Москва : Гидрометеиздат, 1984. — 72 с.
25. *Лунин В. В.* Физическая химия озона / В. В. Лунин, М. П. Попович, С. Н. Ткаченко ; под ред. чл.-корр., проф. В. В. Лунина. — Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1998. — 474 с. : ил.
26. *Мазаев В. Т.* Коммунальная гигиена : учеб. пособие : в 2 ч. — Ч. 1: Коммунальная гигиена / В. Т. Мазаев, А. А. Королев, Т. Г. Шлепнина. — Москва : ГЭОТАР-Медиа, 2005. — 304 с.
27. *Микаева С. А.* Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением / С. А. Микаева, А. С. Микаева // Автоматизация и современные технологии. — 2014. — № 11. — С. 8–11.
28. НДТ 10 № 2'2020. Методы повышения эффективности удаления органических загрязнений из поверхностных вод / М. Ю. Лукьянчук, Т. М. Портнова, Л. И. Плескачевская (ГУП «Водоканал СанктПетербурга»), И. А. Мехнецов, К. И. Столбов (ООО «Экострой-Проект»).
29. *Николаев И. С.* Акведуки античного Рима / И. С. Николаев ; Моск. архитектурный ин-т. — Москва : Принт-Сервис, 2011. — 508 с.
30. ООО «Аква Вита». Автоматизированная система интеллектуального управления технологическим процессом на объектах водоподготовки. Описание программы базы данных производственного процесса водоподготовки. 35533253.425290.001. И4.02. — 24 л.
31. От истока до Москвы: [история московского водопровода] / С. В. Храменков, В. З. Волков, О. М. Горбань, Е. Г. Калашникова, В. П. Фомушкин. — Москва : Прима-Пресс-М, 1999. — 312 с.
32. Очерки истории Древнего Востока / под ред. В. В. Струве. — Ленинград, 1956. — 276 с.
33. *Подзорова Е. А.* Комбинированные радиационные методы очистки воды и сточных вод : дис. ... д-ра хим. наук: 02.00.09 / Е. А. Подзорова. — Москва, 2001. — 299 с. : ил.

34. *Порядин А. Ф.* Водозаборы в системах централизованного водоснабжения / А. Ф. Порядин. — Москва : Изд-во НУМЦ Госкомэкологии России, 1999. — 338 с.
35. *Самойленко Н. И.* Механизм действия перекиси водорода / Н. И. Самойленко, Е. И. Васильева, И. Б. Павлова // Микробиология, эпидемиология и иммунология. — 1983. — № 2. — С. 30–32.
36. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Издание официальное: утвержден и введен в действие Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.07.2000 № 554; введен впервые: дата введения 2021-01-28 / подготовлен главным государственным санитарным врачом РФ. — Москва : Стандартинформ, 2017.
37. *Сахарова А. А.* Очистка и обеззараживание воды с помощью ультразвука / А. А. Сахарова, Э. А. Косьянова // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности : материалы VIII всерос. (с международным участием) науч.-техн. конф. молодых исследователей, Волгоград, 19–24 апреля 2021 года / Волгоградский гос. техн. ун-т. — Волгоград, 2021. — С. 254–256.
38. *Сиваев С. Б.* Муниципальная тарифная политика / С. Б. Сиваев // Некоммерческий фонд реструктуризации предприятий и развития финансовых институтов : информационный бюллетень. — 1999. — Вып. VII. — С. 11–18.
39. *Сиваев С. Б.* Жилищно-коммунальный комплекс. Между политикой и экономикой : экспертно-аналитический доклад / С. Б. Сиваев. — Москва, 2018. — 120 с.
40. *Соколов В. Ф.* Обеззараживание воды бактерицидными лучами / В. Ф. Соколов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Стройиздат, 1964. — 233 с. : ил.
41. *Соколова Н. Ф.* Влияние постоянного тока на вегетативные и споровые формы микроорганизмов в воде. Проблемы обеззараживания и стерилизации / Н. Ф. Соколова, М. Н. Грачева, Н. И. Кистостуров. — Москва : Наука, 1972. — С. 8–12.
42. *Соколова Н. Ф.* Средства и способы обеззараживания воды (аналитический обзор) / Н. Ф. Соколова // Медицинский алфавит. — 2013. — Т. 1, № 5. — С. 44–54.
43. *Фальковский Н. И.* История водоснабжения в России / Н. И. Фальковский / Министерство коммунального хозяйства РСФСР. — Москва, 1947. — 307 с.
44. Федеральный закон «О водоснабжении и водоотведении» от 07.12.2011 № 416-ФЗ.
45. *Черникова О. П.* Ресурсоэффективность металлургического производства / О. П. Черникова, Ю. А. Златицкая // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. — 2022. — Т. 65, № 6. — С. 390–398. — DOI: 10.17073/0368-0797-2022-6-390-398.
46. *Чернинский С. Н.* Обеззараживание питьевой воды / С. Н. Чернинский, Н. Н. Трахтман. — Москва : Медгиз, 1962. — 275 с. : ил.
47. *Чижов А. В.* Высокоскоростной удар капли / А. В. Чижов, А. А. Шмидт ; Физико-техн. ин-т им. А. Ф. Иоффе РАН. — Санкт-Петербург, 2000.
48. *Янин В. Л.* Я послал тебе бересту / В. Л. Янин. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва, 1998. — 462 с.

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

**Ирина Генриховна Казакова**

Гидрогеологический центр «Геоцентр-Москва»,  
АО «Центральное производственно-геологическое объединение»,  
АО «Росгеология»,  
кандидат геолого-минералогических наук

**Ирина Олеговна Тихонова**

Федеральное государственное автономное учреждение  
«Научно-исследовательский институт  
«Центр экологической промышленной политики»,  
кандидат технических наук, доцент

---





Вода — первоначало всего, ибо она имеется везде, где есть жизнь; вода послужила началом земле и воздуху...

*Фалес Милетский (624–547 гг. до н. э.)*

## ВОДА В ПРИРОДЕ

Деятельность человеческого общества немыслима без воды. Проблема водных ресурсов, их сокращения и увеличения — одна из главных в жизни современного человека. Без четкого представления о методах рационального использования этих ресурсов невозможно дальнейшее развитие промышленности, сельского хозяйства, прогресс науки и культуры.

Забота о получении достаточного количества воды, пригодной для питья и удовлетворения культурно-бытовых потребностей населения, волнует человечество на протяжении всего его существования. Достаточно вспомнить, что первый римский водопровод протяженностью 16,5 км был построен в 312 г. до н. э. Характер и формы водоснабжения менялись с изменением социально-экономических условий, прогрессом техники и естественных наук, общим подъемом культуры.

На Земле вода встречается в атмосфере, на поверхности и в земной коре. Водная оболочка земного шара, содержащая воду во всех ее агрегатных состояниях (жидком, твердом и газообразном), названа гидросферой. **Гидросфера** (от древнегреч. ὕδωρ (вода) и σφαῖρα (шар)) представляет собой совокупность атмосферных вод, поверхностных вод (океанов, морей, озер, водохранилищ, болот, рек и т. д.) и подземных вод, включая скопления воды в твердой фазе (снежный покров, ледники, лед мерзлых горных пород)<sup>1</sup>.

В *атмосфере* вода встречается в парообразном состоянии — в воздушной оболочке, окружающей земной шар; в капельножидком — в облаках, туманах и в виде дождя; в твердом — в виде снега, града и кристалликов льда высоких облаков.

На *земной поверхности* вода встречается в жидком состоянии — воды океанов, морей (Мировой океан), озер, водохранилищ, болот, рек, а также в твердом — лед и снег в водоемах и на суше.

<sup>1</sup> *Киссин И. Г.* Вода под землей. — М. : Наука, 1976; *Климентов П. П.* Общая гидрогеология. — М. : Высш. шк., 1980; *Климентов П. П., Богданов Г. Я.* Общая гидрогеология. — М. : Недра, 1977; *Новиков Ю. В., Сайфутдинов М. М.* Вода и жизнь на земле. — М. : Наука, 1981; *Овчинников А. М.* Общая гидрогеология. — М. : Госгеолтехиздат, 1955; *Плотников Н. И.* Подземные воды — наше богатство. — М. : Недра, 1976; *Маккаевев А. А.* Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии. — М. : Недра, 1971; Советский энциклопедический словарь. — М. : Сов. энциклопедия, 1987.

В *земной коре* (в горных породах) по классификации Е. М. Сергеева встречаются подземные воды во всех агрегатных состояниях: парообразном (связанная вода), жидком (свободная вода — капиллярная, гравитационная) и твердом (линзы, прослойки и кристаллики льда в мерзлых породах).

Общая площадь океанов и морей в 2,5 раза превышает территорию суши. Океанические воды покрывают почти три четверти поверхности земного шара слоем толщиной около 4 тыс. м.

Общий объем воды на земле (по данным М. И. Львовича) составляет около 1,5 млрд м<sup>3</sup>, из этого количества 93,96 % воды сосредоточено в океанах и морях (Мировой океан), остальное — воды суши, из которых немногим больше 4 % представляют воды, находящиеся в жидком состоянии — поверхностные воды рек, озер и водохранилищ, подземные воды, почвенная влага, а 1,65 % вод существуют в твердом виде — скованно в ледниках<sup>2</sup>.

Воды атмосферы, поверхностные и подземные воды тесно связаны между собой и находятся в постоянном движении. Под влиянием солнечной энергии и действия сил тяжести в природе происходит непрерывный (вечный) круговорот воды. **Круговорот воды в природе** представляет собой сложный процесс, состоящий из нескольких составляющих: испарения, переноса водяных паров воздушными потоками, образования облаков и выпадения осадков, поверхностного и подземного стока вод суши в Мировой океан.

Испаряясь с поверхности океанов, морей, рек, озер, суши и растительного покрова, вода переходит в атмосферу в виде пара. В процессе перемещения воздушных масс водяные пары переносятся над поверхностью земли, при определенных условиях сгущаются и выпадают на землю в виде дождя или снега. Выпавшие на поверхность земли атмосферные осадки частью стекают в реки, моря и океаны, некоторое их количество расходуется на питание растений, частично просачивается через почву в пласты горных пород, достигая уровня подземных вод, а некоторый их объем вновь испаряется в атмосферу. Через какое-то время просочившиеся осадки на пониженных участках поверхности (например, на берегах морей, в долинах рек, в балках и оврагах) могут снова появиться на поверхности в виде источников (выходы подземных вод на поверхность). Воды таких источников также стекают в реки и моря и расходуются на испарение.

В общей схеме выделяют несколько круговоротов воды: большой (внешний), малый и внутренний (рис. 1).

При *большом круговороте* часть водяных паров, образовавшихся в результате испарения воды океанов и морей переносится на сушу, где выпадает в виде осадков, некоторое количество из которых вновь стекает в моря и океаны в виде поверхностного и подземного стоков.

В процессе *малого круговорота* часть испарившейся влаги с поверхности океанов и морей выпадает здесь же в виде осадков.

<sup>2</sup> Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Новиков Ю. В., Сайфутдинов М. М. Вода и жизнь на земле; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.

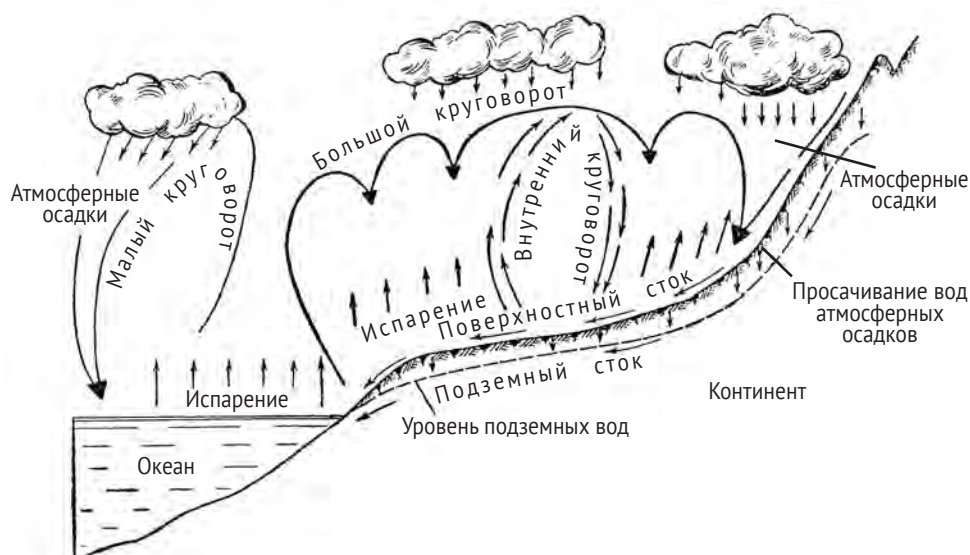


Рис. 1. Схема круговорота воды в природе

*Внутренний круговорот* обеспечивается водой, которая испаряется в пределах материков — с водной поверхности рек и озер, с суши и растительности и там же выпадает в виде осадков. Эти осадки снова расходуются на сток и испарение, причем часть испарившейся влаги вновь выпадает на материке.

Важными составляющими круговорота воды в природе являются поверхностный и подземный стоки<sup>3</sup>.

**Поверхностный сток** — процесс перемещения дождевой и талой воды по земной поверхности под влиянием силы тяжести. Поверхностный сток делится на склоновый и русловой. Склоновый сток образуется за счет дождевых и талых вод и происходит на поверхности склона вне фиксированных путей. Русловой сток проходит по определенным линейным направлениям — в руслах рек, днищах оврагов и балок.

**Подземный сток** — перемещение гравитационных подземных вод в зоне полного насыщения под действием гидравлического напора или силы тяжести.

Количественное выражение круговорота воды для отдельных территорий, речных бассейнов, регионов или земного шара в целом называется **водным балансом**.

<sup>3</sup> Зекцер И. С. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. — М. : Научный мир, 2012; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Новиков Ю. В., Сайфутдинов М. М. Вода и жизнь на земле; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство; Подземный сток на территории СССР / под ред. Б. И. Куделина. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1966.

В общем объеме круговорота воды на Земле ведущее место занимает океаническое звено: на суше выпадает только четвертая часть (113,5 тыс. км<sup>3</sup>) всех осадков, остальные (411,6 тыс. км<sup>3</sup>) приходятся на долю Мирового океана.

Осадки на поверхности суши создают ресурсы поверхностных вод и являются основным источником формирования пресной воды. Пресные воды имеются главным образом в ледниках полярных и горных областей, озерах и водохранилищах, болотах и в руслах рек. Пресные воды составляет менее 3% от общего объема воды гидросферы, из них технически доступно для использования всего 0,3%. Большая часть пресной воды в виде ледников сосредоточена в Гренландии и Антарктиде.

Круговорот воды — это исключительно важное свойство гидросферы. Благодаря ему общее количество воды на Земле не уменьшается, и вода поэтому практически неисчерпаема. В этом заключается существенное отличие водных ресурсов от других полезных ископаемых. Все формы круговорота воды составляют единый гидрологический цикл, в процессе которого происходит возобновление всех видов вод. Подсчитано, что пары атмосферы обновляются в среднем каждые 10 сут, речные воды в руслах рек — в среднем каждые 11 сут, почвенная влага и воды верховодки Земли возобновляются ежегодно. Более медленно происходит возобновление подземных вод, особенно глубоко залегающих, а также вод в озерах, болотах и ледниках (табл. 1)<sup>4</sup>.

Таблица 1. Характеристика мировых запасов вод

Составляющие гидросферы	Общий объем воды		Объем пресных вод		Время возобновления	Использование
	тыс. км <sup>3</sup>	%	тыс. км <sup>3</sup>	%		
Мировой океан	1 370 323	93,96	—	—	3000 лет	Не используются
Подземные воды, в т. ч. в зоне свободного водообмена	64 000	4,38	4000	14	5000 лет	Питьевые, хозяйственно-бытовые цели
Ледники	24 000	1,65	24 000	85	8000 лет	Не используются
Озера и водохранилища	280	0,02	155	0,55	7 лет	Широкое использование
Почвенная влага, в т. ч. оросительные воды	85	0,005	83	0,3	1 год	Потребление растениями
Атмосферная влага	14	0,001	14	0,05	10 сут	Не используются
Болота	11	0,0008	8	0,03	5 лет	Не используются
Реки	1,2	0,0001	1,2	0,005	11 сут	Широкое использование

<sup>4</sup> Гидрогеология СССР. Т. 1. — М. : Недра, 1966; Каменский Г. Н. и др. Гидрогеология СССР. — М. : Госгеолтехиздат, 1959; Киссин И. Г. Вода под землей; Новиков Ю. В., Сайфутдинов М. М. Вода и жизнь на земле; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.

Круговорот воды оказывает решающее влияние на формирование ресурсов поверхностных вод и подземных вод верхней части земной коры.

**Водные ресурсы** — это запасы пресной воды на планете, которые сосредоточены в поверхностных и подземных водных объектах, атмосфере и почве. Активно используемые водные ресурсы образуют водный фонд.

**Источниками питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения** на Земле служат пресные поверхностные воды рек и озер, а также подземные воды.

**Водный фонд РФ** — совокупность водных объектов в пределах территории Российской Федерации, включенных или подлежащих включению в Государственный водный кадастр<sup>5</sup>. Наиболее широко используются реки, подземные водоносные горизонты и озера, в которых сосредоточено 55 % ресурса. Озера и подземные воды кроме ресурса характеризуются статическими (вековыми) запасами, которые составляют около 54 068 км<sup>3</sup> (табл. 2).

Таблица 2. Суммарные водные ресурсы России  
(по данным Центра регистра и кадастра)

Ресурсы	Среднеголетний объем возобновляемого стока		Статические запасы	
	км <sup>3</sup> /год	%	км <sup>3</sup>	%
Речной сток*	4270	42	–	–
Озера	532	5	26 068	27
Болота	1000	10	3000	3
Ледники	110	1	39 890	41
Подземные воды	787,5	8	28 000	29
Почвенная влага	3500	34	–	–
Всего	10 199,5	100	96 958	100

\* В том числе 227 км<sup>3</sup>/год речного стока, поступающего с территории других государств.

**Водные ресурсы** на Земле распределены неравномерно. В первую очередь это касается запасов пресных вод, пригодных для жизнеобеспечения человека. Острый недостаток в пресной воде испытывают огромные районы Африки, Ближнего и Среднего Востока, Южной и Северной Америки, Австралии. Более трети населения земного шара живет в условиях дефицита пресной воды.

Сюда относятся такие высокоразвитые в промышленном отношении страны, как США, Германия, Нидерланды, Япония. Несмотря на значительный объем речного стока на территории Индии и Китая, водообеспеченность населения этих стран значительно ниже, чем во многих других странах<sup>6</sup>.

Актуальную информацию о ресурсах, качестве и использовании поверхностных и подземных вод Российской Федерации по ее субъектам, федеральным

<sup>5</sup> Закон РФ «Водный кодекс Российской Федерации».

<sup>6</sup> Новиков Ю. В., Сайфутдинов М. М. Вода и жизнь на земле.

округам, стране в целом, основным речным бассейнам и их участкам, а также сведения о запасах и уровнях воды в крупнейших водоемах страны можно узнать в справочном издании «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество»<sup>7</sup> — это один из видов информационной продукции Водного кадастра Российской Федерации. В соответствии с установленным регламентом его подготовка осуществляется ежегодно за предыдущий год. Издание предназначено для федеральных органов власти, органов власти федеральных округов и субъектов Российской Федерации, а также организаций, занимающихся проектированием водохозяйственных и природоохранных мероприятий в масштабе субъектов Российской Федерации.

Общий объем речного стока для территории Российской Федерации в 2020 г. составил 4565 км<sup>3</sup>, что существенно больше среднемноголетнего значения. Из этого объема 4316,9 км<sup>3</sup> — воды местного формирования, 248,1 км<sup>3</sup> воды поступило с территорий сопредельных государств. В Северо-Западном, Приволжском, Южном, Уральском и Дальневосточном федеральных округах наблюдалась повышенная водность рек, в Сибирском и Центральном федеральных округах — близкая к норме. В Северо-Кавказском федеральном округе водные ресурсы были ниже среднемноголетних значений (рис. 2).

Водные ресурсы рек в 2020 г. интенсивно использовались в процессе хозяйственной деятельности. Наиболее интенсивное их использование было отмечено в Центральном, Южном, Северо-Кавказском, Приволжском и Сибирском федеральных округах, где основные водопотребители — промышленность и орошаемое земледелие. Изъятия воды из рек Северо-Западного федерального округа были существенно меньшими, а из рек Уральского и Дальневосточного федеральных округов — весьма незначительными. В целом по России было забрано около 58 км<sup>3</sup> пресной воды, из них 47 км<sup>3</sup> из поверхностных и 11 км<sup>3</sup> из подземных водных источников. В течение года общий запас воды в крупных водохранилищах уменьшился на 17,61 км<sup>3</sup>.

Под объемом использованной воды из природных водных источников понимается объем забранной воды за вычетом потерь при транспортировке и переброске стока. Картой и диаграммами проиллюстрированы данные, характеризующие использование вод по федеральным округам Российской Федерации в 2020 г. Карта отображает выраженные в процентах отношения объемов использования воды к объемам местного стока. Диаграммы на карте отображают объемы воды, забранной из природных источников, использованной и сброшенной во все виды водных объектов (рис. 3).

Изучением поверхностных вод занимается наука гидрология, изучением подземных вод — наука гидрогеология<sup>8</sup>.

<sup>7</sup> Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество : (ежегодное издание) / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. 2020 год. — СПб., 2021.

<sup>8</sup> Гидрогеология СССР. Т. 1; Каменский Г. Н. и др. Гидрогеология СССР; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Ланге О. К. Основы гидрогеологии. — М. : Изд-во Моск. ун-та, 1958; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.

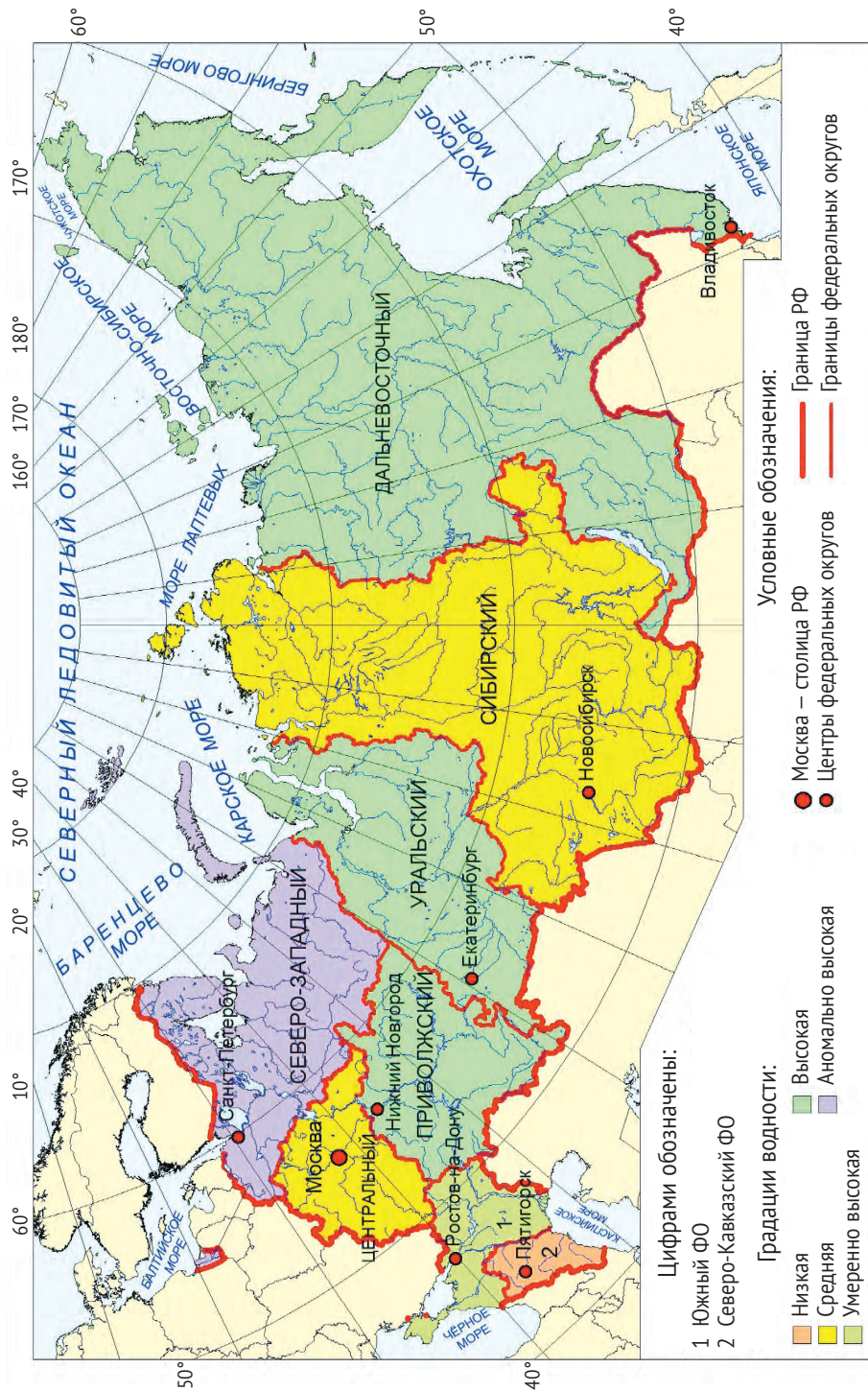


Рис. 2. Водность рек по федеральным округам Российской Федерации по данным ежегодного справочного издания Водного кадастра РФ «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» за 2020 г.

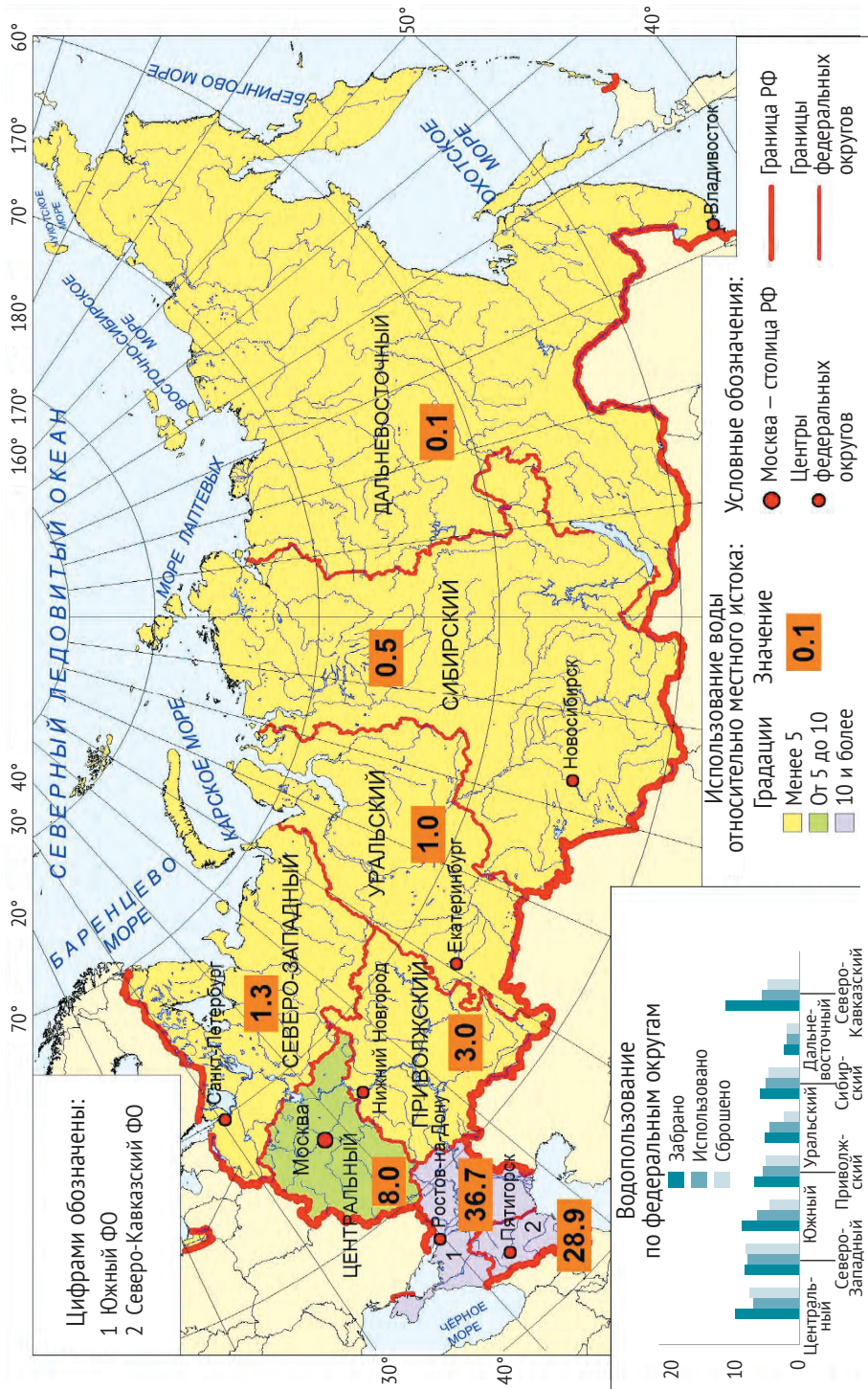


Рис. 3. Использование воды по федеральным округам Российской Федерации по данным ежегодного справочного издания Водного кадастра РФ «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» за 2020 г.



## ПОДЗЕМНЫЕ ВОДЫ

Подземные воды — это самое драгоценное полезное ископаемое.

*А. Н. Карпинский (1931 г.)*

Подземные воды, залегающие в толщах горных пород, являются частью водной оболочки (гидросферы) Земли, они тесно связаны с поверхностными водами и водами атмосферы. Возникновение жизни на Земле, образование современной атмосферы, расчленение земной коры на относительно устойчивые платформенные и геосинклинальные области обусловили около 2,5–3,0 млрд лет назад появление пресной воды и формирование большого круговорота воды на земном шаре. В ранний период развития Земли гидросфера претерпела сложную эволюцию как по количеству воды, так и по ее составу.

С начала возникновения большого круговорота воды на земном шаре наряду с солеными водами океанов и морей в формировании подземных вод принимают участие пресные воды атмосферных осадков, первые из них накапливаются при осадкообразовании в морских бассейнах, а вторые — на суше. В процессе геологического развития континентов их состав претерпевал значительные изменения при взаимодействии воды с горными породами, газами, органическими остатками и живыми организмами при различных температурах и давлениях.

Подземные воды играют важную роль в жизни людей. Особое значение подземные воды приобретают в тех районах, где поверхностных вод очень мало или совсем нет. В этих случаях только подземные воды дают возможность существования людям, животным и растениям.

### *Историческая справка об использовании подземных вод*

Вода... — это та живая кровь, которая создает жизнь там, где ее не было.

*А. Н. Карпинский (1931 г.)*

Из истории известно, что центры древней цивилизации нередко располагались на площадях, где легко можно было добывать не только поверхностную, но и подземную воду. В отдельных районах развитие цивилизации прекращалось, если исчерпывались запасы водных источников.

Практические навыки добывания подземной воды несомненно быстрее развивались в засушливых районах, где было мало поверхностных вод. Такие районы в нашей стране расположены на юго-востоке; они характеризуются редкими поверхностными водотоками и локальным распространением пресных подземных вод. Нельзя считать случайным и то обстоятельство, что большинство поселений (в том числе и столичных городов) расположено по берегам рек, где легко использовать наряду с поверхностными водами и пресные подземные воды, залегающие часто на незначительной глубине в песчаных

отложениях. Нередко у основания склонов речных долин выходят источники с водой высокого качества. Воды этих источников широко используются для водоснабжения и других целей. Кроме того, поверхностные водотоки удобно также использовать для сброса бытовых вод.

Первые сведения о подземных водах существовали уже в глубокой древности<sup>9</sup>. Человек использовал подземные воды еще в доисторические времена. Развитие древних цивилизаций в засушливых районах Азии и Ближнего Востока требовало совершенствования техники водоснабжения. Еще во III–II тыс. до н. э. в Египте научились сооружать колодцы глубиной до 100 м. Колодцы были источниками водоснабжения на караванных путях в пустыне.

К древнейшим гидротехническим сооружениям относятся также водосборные галереи — кяризы. Эти водосборные галереи проходили с небольшим наклоном в водоносных породах. С поверхностью галереи сообщались посредством колодцев (рис. 4).

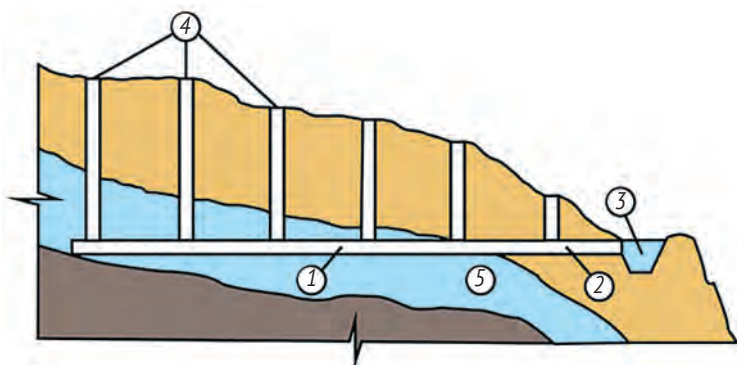


Рис. 4. Схема кяриза:

- 1 — водозаборная шtolья; 2 — водоотводящая галерея; 3 — водоприемный канал;  
4 — смотровые колодцы; 5 — водоносный пласт

Кяризы использовались для водоснабжения и орошения земель. Они были известны еще в Древнем Вавилоне и существуют поныне в некоторых районах Средней Азии, Азербайджане, а также в Иране, Афганистане, Индии и других странах. В Иране кяризы называют канатами. Наиболее крупные водосборные галереи здесь имеют длину до 43 км и заложены на глубине до 300 м, дебит их достигает 0,9 м<sup>3</sup>/с, общее количество кяризов в Иране — около 40 тыс., а суммарный дебит 600–700 м<sup>3</sup>/с.

В I тыс. до н. э. водопроводы Карфагена и многих греческих городов получали воду из каптированных источников. Воды источников использовались

<sup>9</sup> Гусев С. Н., Небольсина К. А. Водоснабжение на базе артезианских скважин. — М. : Колос, 1976; Киссин И. Г. Вода под землей; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Ланге О. К. Основы гидрогеологии; Маккавеев А. А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии; Новиков Ю. В., Сайфутдинов М. М. Вода и жизнь на земле; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.

и для водоснабжения Рима. Древние римляне умели находить водоносные слои и вскрывали их с помощью дренажных каналов. Марк Витрувий Поллион — римский архитектор и инженер, живший во второй половине I в. до н. э. и первой половине I в. н. э., построил акведук, по которому воды источников поступали из долины Тибра в Рим. В Древнем Китае в III в. до н. э. для сооружения колодцев был применен станок ударно-канатного бурения. На Керченском полуострове был обнаружен колодец, выкопанный в I в. н. э.

Широко использовались подземные воды на Руси. Уже в IX–XI вв. русские умельцы приобрели большой опыт устройства колодцев и каптажа источников, а в IX в. начали бурить первые скважины для добычи рассолов, из которых вываривали соль (Соловецкий монастырь, побережье Белого моря, устье Северной Двины). Археологическими исследованиями в Новгороде был обнаружен водопровод, построенный из деревянных труб в XI в., по нему вода подавалась от родников к княжескому двору. В конце XV в. был оборудован водопровод в Московском Кремле. С XVI в. известны водопроводы в Соловецком монастыре и Троице-Сергиевой лавре. В конце XVII и начале XVIII в. сооружаются крупные водопроводы — Петергофский и Лиговский, которые использовали поверхностные и грунтовые воды окрестностей Петербурга.

Бурение скважин в Европе начали применять с XII в. В 1126 г. на севере Франции в провинции Артуа начато бурение водяных скважин. От латинского названия этой провинции произошло название напорных подземных вод — артезианские воды.

Большие масштабы бурение артезианских скважин приобретает в XIX в. в России в связи с развитием городов и увеличивающимися потребностями водоснабжения. В 30-х гг. XIX в. был пробурен ряд артезианских скважин для водоснабжения Одессы, Петербурга, Тамбова, Казани и других городов. В Москве в 1876 г. артезианская скважина на Яузском бульваре достигала глубины 458 м.

В России на территории Центрального федерального округа (ЦФО) подземные воды являются основным источником питьевого, хозяйственно-бытового и технического водоснабжения населения и предприятий. В 14 из 18 субъектов ЦФО доля использования подземных вод в системе водоснабжения превышает 50%. В Белгородской, Воронежской, Курской, Липецкой, Орловской, Смоленской, Тамбовской и Тульской областях водоснабжение полностью обеспечивается за счет добычи подземных вод (табл. 3)<sup>10</sup>.

Для понимания технологий добычи и эксплуатации подземных вод для целей водоснабжения необходимо знать основные положения о развитии и становлении геологической науки о подземных водах — гидрогеологии: условия залегания, распространения, зональность, состав и качество подземных вод, методы и методики поисков и разведки, оценка ресурсов и запасов подземных вод, рациональное использование и охрана подземных вод.

<sup>10</sup> Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 год» / ФГБУ «Гидроспецгеология». — М., 2022. — Вып. 27.

Таблица 3. Подземные воды в балансе хозяйственно-питьевого водоснабжения на территории субъектов ЦФО (по данным ведения регионального мониторинга подземных вод на территории ЦФО)

Субъект РФ	Доля использования подземных вод, %	Субъект РФ	Доля использования подземных вод, %
Белгородская область	100	Москва	1
Брянская область	79	Московская область	83
Владимирская область	82	Орловская область	100
Воронежская область	100	Рязанская область	59
Ивановская область	53	Смоленская область	100
Калужская область	72	Тамбовская область	100
Костромская область	13	Тверская область	100
Курская область	100	Тульская область	100
Липецкая область	100	Ярославская область	3

***Историческая справка о становлении и развитии науки гидрогеологии, основные направления и задачи***

Гидрогеология, как и многие другие научные и прикладные дисциплины, возникла и развивалась из необходимости удовлетворения многочисленных запросов народного хозяйства<sup>11</sup>. Гидрогеология, подобно другим областям знаний, возникла в глубокой древности из практических потребностей человека, но оформилась как наука только в конце XIX в.

В России первые систематические исследования подземных вод связаны с созданием Российской академии наук (1724 г.). Первые научные представления о подземных водах как о природных растворах, их образовании путем инфильтрации атмосферных осадков и геологической деятельности подземных вод были высказаны М. В. Ломоносовым в сочинении «О слоях земных» (1763 г.). Термин «гидрогеология» был предложен в 1802 г. французским естествоиспытателем Ж. Б. Ламарком (1744–1829). Под гидрогеологией Ламарк понимал науку о геологической деятельности воды, явлении разрушения и отложения водой горных пород.

До середины XIX в. учение о подземных водах развивалось как составная часть геологии, после чего обособилось в отдельную дисциплину. В середине XIX в. в гидрогеологии разрабатываются законы движения подземных вод. Так, в 1856 г. французский инженер Анри Дарси (1803–1858), занимаясь проблемами водоснабжения города Дижона, установил основной закон фильтрации в пористом грунте, известном сейчас как линейный закон фильтрации или закон Дарси, являющийся базовым в подземной гидродинамике. Наряду

<sup>11</sup> Каменский Г. Н. и др. Гидрогеология СССР; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Ланге О. К. Основы гидрогеологии; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.

с гидродинамикой ведется глубокое изучение химии воды. В этом плане нельзя не назвать величайшее открытие XIX в. — Периодический закон великого русского химика Д. И. Менделеева (1834–1907). Этот закон является одним из фундаментальных в области естествознания, основополагающим для правильного понимания химии всех водных растворов Земли и базовым для геохимии в целом и гидрогеохимии в частности.

В 1882 г. в России был организован Геологический комитет, который проводил геологическую съемку страны и начал масштабные гидрогеологические исследования. Экспедициями Академии наук и Геологического комитета, а также в результате практической деятельности, связанной с организацией водоснабжения за счет использования подземных вод, были получены первые сведения о распространении подземных вод в различных районах страны; природной зональности и связи химического состава подземных вод с физико-географическими условиями; распространении глубоких артезианских вод; значительный интерес представляли результаты исследований кавказских минеральных вод, первые сведения о подземных водах районов распространения вечной мерзлоты и др.

Таким образом, ко второй половине XIX в. сформировались достаточно верные представления о происхождении, составе и распространении подземных вод в верхней части земной коры, сформулированы первые законы, заложены основы изучения региональных закономерностей, появились первые классификации подземных вод, первые гидрогеологические карты. Все это позволяет заключить, что становление гидрогеологии как науки состоялось именно в это время.

На рубеже XIX и XX столетий в России уже имелась целая группа талантливых ученых-гидрогеологов (С. Н. Никитин, И. В. Мушкетов, А. А. Краснопольский, Н. Ф. Погребов, Ф. П. Саваренский, А. Ф. Лебедев, В. И. Вернадский, Г. Н. Каменский, Н. Н. Славянов, О. К. Ланге и др.), которые заложили основы изучения подземных вод в нашей стране.

В дальнейшем гидрогеология развивалась по нескольким направлениям<sup>12</sup>:

- 1) региональному — исследовались все новые и новые бассейны подземных вод в разных странах мира и геологических структурах;
- 2) генетическому — в научный анализ включались воды все более и более глубоких горизонтов: соленые, рассолы, термальные;
- 3) гидродинамическому — вывод новых формул и выявление закономерностей движения воды разных видов в различных геологических структурах, математическое моделирование;
- 4) гидрогеохимическому — исследование состава и условий формирования разнообразных типов воды, использование полученных данных в решении различных задач, включая поиски полезных ископаемых;

<sup>12</sup> Каменский Г. Н. и др. Гидрогеология СССР; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Ланге О. К. Основы гидрогеологии; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство; Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод. — М. : Недра, 1973; Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения : метод. пособие. — М. : Недра, 1969.

- 5) палеогидрогеологическому — история воды и ее геологическая роль;
- 6) экологическому — охрана, рациональное использование и управление подземными водами.

В настоящее время гидрогеология в России оформилась в сложную комплексную науку, включающую в себя следующие самостоятельные научно-методические направления: общая гидрогеология; динамика подземных вод; гидрогеохимия; методика гидрогеологических исследований; гидрогеология месторождений полезных ископаемых; учение о минеральных водах; радиогидрогеология; региональная гидрогеология; учение о месторождениях подземных вод; мелиоративная гидрогеология; учение о режиме и балансе подземных вод; гидрогеологическое моделирование; палеогидрогеология; криогидрогеология; инженерная и экологическая гидрогеология.

Прикладные практические задачи гидрогеологии в связи с запросами народного хозяйства страны, а также с ухудшающейся экологической обстановкой чрезвычайно разнообразны и многочисленны. Основными из них являются:

- изыскание источников и организация водоснабжения пресными подземными водами населенных пунктов, сельскохозяйственных и промышленных объектов и промышленных предприятий;
- решение задач мелиоративной гидрогеологии: гидрогеологические исследования в связи с орошением земель в аридных областях и осушением — в избыточно увлажненных (заболоченных);
- изыскания под гидротехническое строительство (гидрогеологическая оценка районов строительства, определение фильтрационных потерь воды);
- разведка и оценка месторождений минеральных вод, используемых на бальнеологических курортах и в санаториях, а также во вновь осваиваемых промышленных районах;
- поиск, разведка и геолого-промышленная оценка месторождений промышленных вод как химического сырья для извлечения йода, брома, лития, стронция и др.;
- разведка и оценка рентабельности использования термальных и перегретых вод для целей теплофикации и строительства геотермальных электростанций;
- обеспечение выполнения задач горного дела, а также промышленного и гражданского строительства;
- применение гидрогеохимических методов поисков месторождений рудных полезных ископаемых, а также нефти, газа и др.;
- радиогидрогеологические поиски месторождений атомного сырья и решение использования радиоактивных вод;
- решение задач по гидрогеологическому и геоэкологическому обоснованию строительства, охране подземных вод от истощения и загрязнения и разработке превентивных и компенсационных мероприятий.

Гидрогеология — комплексная наука. Она развивается на стыке геологии, геофизики, геохимии, гидрологии и ряда других наук. При этом гидрогеология не только использует новейшие достижения этих наук, но и обогащает их своими успехами. Ибо вода участвует во многих процессах, происходящих как на поверхности, так и в глубине нашей планеты.

### *Классификации подземных вод*

В процессе развития науки и практической деятельности в области использования подземных вод для более широкого и глубокого понимания взаимосвязи разных направлений знаний о подземных водах и получения новых знаний разрабатывались классификации подземных вод.

Существует много классификаций подземных вод. Это объясняется сложностью и большим разнообразием природных условий нахождения подземных вод, а также различными требованиями, предъявляемыми при эксплуатации тех или иных типов вод. Подземные воды классифицируются по происхождению, условиям залегания, гидродинамическим показателям, температуре, качественному составу, литологическим особенностям вмещающих пород, геологическому возрасту водоносных пластов и другим признакам. Существующие классификации подземных вод можно объединить в три группы.

1. *Химические классификации природных вод*, в том числе подземных, включая минеральные и нефтяные, В. И. Вернадского (1929, 1932, 1933, 1934, 1936 гг.), Ч. Пальмера (1911 г.), В. А. Александрова (1932 г.), Н. Н. Славянова (1933 г.), Н. И. Толстихина (1936, 1937 гг.), Г. А. Максимовича (1944 г.), О. А. Алекина (1946 г.), А. М. Овчинникова (1947, 1955 гг.), М. Е. Альтовского и В. М. Швеца (1956 г.) и др.

2. *Общие классификации подземных вод* по происхождению, условиям залегания и другим признакам, предложенные Штейером (1907 г.), О. Е. Мейнцером (1923 г.), М. Канавари (1928 г.), А. М. Жирмунским и А. А. Козыревым (1928 г.), в настоящее время имеют только исторический интерес; О. К. Ланге (1933, 1938, 1950, 1958 гг.), Н. Н. Славяновым (1933, 1935 гг.), Ф. П. Саваренским (1935, 1939 гг.), Г. Н. Каменским (1947 г.), Г. А. Максимовичем (1948 г.), А. Н. Семихатовым (1954 г.), Н. И. Толстихиным (1954, 1956, 1959 гг.), М. Е. Альтовским (1958 г.), А. М. Овчинниковым и П. П. Климентовым (1962 г.), Н. Н. Биндеманом (1968 г.) и др.

3. *Частные классификации*, объединенные с общими и разработанные по одному или нескольким признакам Н. И. Толстихиным (1933, 1940, 1941 гг.) для подземных вод области распространения многолетнемерзлых пород, А. И. Дзенс-Литовским (1940, 1945, 1948 гг.) для вод соляных месторождений, А. М. Овчинниковым (1949 г.) и С. В. Троянским (1956 г.) для вод районов молодого вулканизма, А. Н. Токаревым (1956 г.) для радиоактивных вод, Н. И. Плотниковым, М. В. Сыроватко и Д. И. Щеголевым (1957 г.) для подземных вод рудных месторождений, Н. И. Плотниковым (1959 г.) для подземных вод, используемых при водоснабжении.

### *Строение подземной гидросферы*

Подземная гидросфера сверху ограничена поверхностью земли, нижняя ее граница достоверно еще не установлена. По мнению одних исследователей, ее условно можно провести на глубине 12–16 км, других — на глубине 70–100 км в разных геотектонических областях.

В пределах подземной гидросферы состояние воды, ее структура и свойства меняются по мере изменения температуры и давления в земной коре и мантии. В подземной гидросфере выделяют следующие гидрофизические зоны<sup>13</sup>: 1) зона аэрации; 2) мерзлая зона земной коры; 3) зона насыщения; 4) зона переплотненного водяного флюида; 5) зона жидкопластического водного раствора силикатов и алюмосиликатов; 6) зона диссоциированных молекул воды.

Практический интерес для народного хозяйства представляют три зоны.

**Зона аэрации** охватывает верхние слои литосферы от дневной поверхности до уровня подземных вод. В этой зоне поры пород обычно заполнены воздухом и парами воды, а также прочно- и рыхлосвязанной капиллярной водой. Периодически весной в период таяния снега или во время выпадения интенсивных дождей в породах зоны аэрации образуется свободная (гравитационная) вода.

Мощность зоны аэрации зависит от литологических особенностей пород (глубины залегания водонепроницаемых толщ), рельефа местности, степени расчлененности поверхности земли (дренированности территории), климатических условий. Она изменяется в широких пределах — от долей метра до 100 м и более. На обширных площадях, где подземные воды достигают поверхности земли, образуя заболоченные территории, зона аэрации может отсутствовать.

Через зону аэрации осуществляется тесная связь подземных вод с атмосферой — дождевыми и талыми водами, проникающими вглубь и пополняющими ресурсы подземных вод.

**Мерзлая зона земной коры (криолитозона)** отличается преимущественным распространением подземных вод в твердой фазе. Она охватывает обширные северные районы Евразии и Америки, Антарктиду, а также высокогорные территории горно-складчатых сооружений, всего многолетнемерзлые породы (ММП) занимают около 24 % территории суши. В данной зоне господствуют отрицательные температуры, значения которых колеблются от 0 до  $-15^{\circ}\text{C}$ . Мощность мерзлой зоны изменяется до 1000 м и более. В зоне распространения ММП также встречаются подземные воды в жидкой фазе в виде таликов пресных вод и минерализованные воды с отрицательными температурами. Пресные воды непромерзаемых надмерзлотных таликов и пластовые межмерзлотные и подмерзлотные воды используются для постоянного водоснабжения населенных пунктов, железнодорожных станций и других объектов. Подземные воды районов распространения ММП (их происхождение, распространение, залегание и т. д.) изучает криогидрогеология в рамках геокриологии (мерзлотоведения).

**Зона насыщения** (жидких вод) распространяется повсеместно и охватывает почти всю площадь континентальной литосферы. Основная особенность ее заключается в том, что все пустоты и поры пород в ней полностью заполнены (насыщены) свободной и связанной водой. Исключения составляют только

<sup>13</sup> Каменский Г. Н. и др. Гидрогеология СССР; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Ланге О. К. Основы гидрогеологии; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.



площади месторождений нефти и газа. Сверху эта зона граничит с зоной аэрации или мерзлой зоной. Нижняя граница зоны (глубина залегания критической температуры воды 374–450° С) зависит от тектонического строения территории земной коры. В областях современной вулканической деятельности она прослеживается на глубине около 8–10 км, а в областях докембрийской складчатости достигает 30–35 км и более.

### *Понятие водоносных и водоупорных пород*

Зона насыщения сложена различными по литологическим особенностям и геологическому возрасту породами. При аккумуляции подземных вод, просачивании их через толщи пород, а также отдаче породами воды при их эксплуатации колодцами и скважинами выделяются водоносные (закрывающие гравитационную воду) и водоупорные (практически водонепроницаемые) породы<sup>14</sup>.

**Водоносными** называются такие породы, которые содержат свободную воду и способны пропускать ее через свою толщу и сравнительно легко отдавать под действием силы тяжести. К таким породам относятся: галечники, гравелиты, слабосцементированные конгломераты и песчаники, пески, алевролиты, известняки и доломиты, трещиноватые магматические и метаморфические породы.

К **водоупорным (водонепроницаемым)** относятся такие породы, которые весьма слабо пропускают (фильтруют) или совсем не способны пропускать и отдавать воду в природных условиях; такими породами являются глины, тяжелые суглинки, плотный хорошо разложившийся торф, глинистые сланцы, аргиллиты, каменная соль, гипс, мергели, а также все плотные магматические и часть метаморфических пород.

**Стратификация** (от лат. *stratum* — слой, пласт; *facere* — делать) — положение отдельных частей геологических образований в вертикальном разрезе. Может устанавливаться на основании возрастных, литологических, петрографических, химических, морфологических и других особенностей геологических образований, слагающих разрез.

При расчленении разрезов рыхлых и слабосцементированных осадочных и метаморфических пород, представляющих собой пластово-поровые или порово-трещинные коллекторы подземных вод, следует пользоваться наиболее распространенными гидрогеологическими подразделениями (от более мелких к крупным): водоносный горизонт, водоносный комплекс, гидрогеологический этаж.

Под **водоносным горизонтом** принято понимать относительно выдержанную по площади и в разрезе насыщенную свободной гравитационной водой

<sup>14</sup> Гусев С. Н., Небольсина К. А. Водоснабжение на базе артезианских скважин; Киссин И. Г. Вода под землей; Климентов П. П. Общая гидрогеология; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Ланге О. К. Основы гидрогеологии; Маккавеев А. А. Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство.

одно- или разновозрастную толщу горных пород, представляющую собой в гидродинамическом отношении единое целое.

По условиям залегания и режиму выделяются водоносные горизонты *грунтовых, межпластовых ненапорных и артезианских (или напорных) вод* (рис. 5).

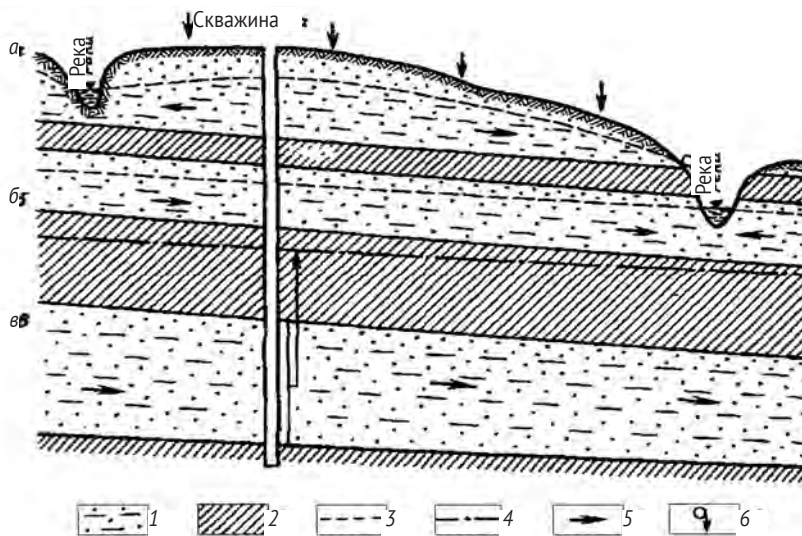


Рис. 5. Типовые схемы залегания водоносных горизонтов:

1 – водоносные горизонты (*а* – грунтовые воды; *б* – межпластовые ненапорные; *в* – артезианские); 2 – водоупорные породы; 3 – уровень ненапорных вод; 4 – пьезометрический уровень напорных вод (стрелкой обозначен напор); 5 – направление движения подземных вод; 6 – разгрузка грунтовых вод через нисходящий родник

Водоносный горизонт может быть представлен как одним, так и несколькими слоями водонасыщенных пород, отличающихся или сходных по геологическому возрасту, литологическим особенностям и фильтрационным свойствам; при сложении только одним пластом горизонт будет простым однослойным, а при многих пластах — сложным слоистым: двух-, трехслойным или многослойным.

**Водоносный комплекс** представляет собой выдержанную в вертикальном разрезе и имеющую региональное распространение водонасыщенную толщу одно- или разновозрастных и разнородных по составу пород, ограниченную сверху и снизу регионально выдержанными водоупорными (или относительно водоупорными) пластами, исключающими или затрудняющими гидравлическую связь со смежными водоносными комплексами и обеспечивающими присущие данному комплексу определенные особенности гидродинамического и гидрогеохимического режима вод. Водоносный комплекс включает в себя несколько в различной степени выдержанных водоносных горизонтов. В отличие от горизонтов в комплексе напоры подземных вод могут изменяться в вертикальном разрезе, что предопределяется степенью гидравлической связи отдельных составляющих его горизонтов (рис. 6).

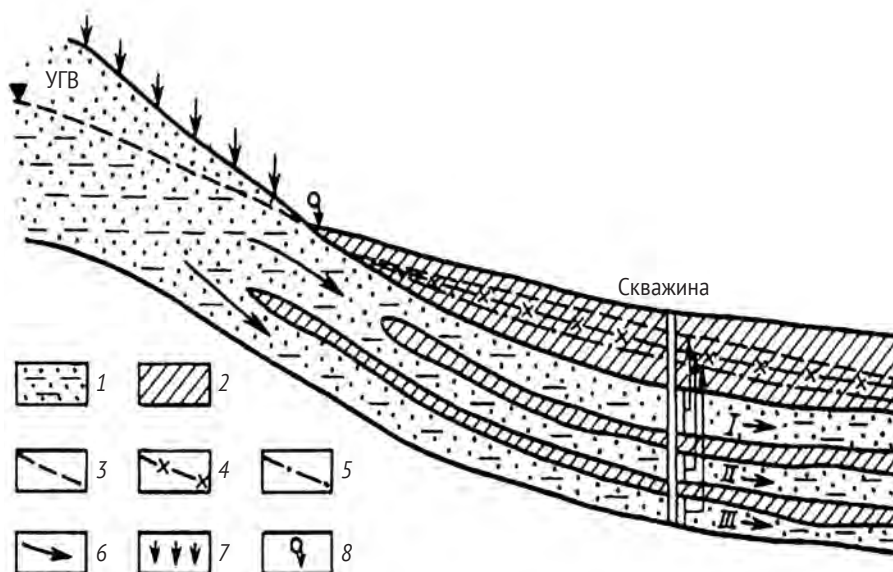


Рис. 6. Схема строения водоносного комплекса:

1 – водопроницаемые породы (пески); 2 – водоупорные породы; 3–5 – пьезометрические уровни соответственно I, II, III водоносных горизонтов; 6 – направление движения подземных вод; 7 – область питания водоносного комплекса (поглощение осадков); 8 – нисходящий источник

Под **гидрогеологическим этажом** понимается совокупность водоносных комплексов, ограниченных или только снизу, или и сверху и снизу мощными регионально выдержанными в пределах водонапорной системы толщами водоупорных пород. Гидрогеологические этажи отличаются друг от друга степенью водообмена, различными особенностями процесса формирования подземных вод, а также неодинаковыми чертами палеогидрогеологического развития.

**Верховодкой** называются подземные воды, которые образуются за счет инфильтрации атмосферных и поверхностных вод в породах зоны аэрации, а также в результате конденсации водяных паров в горных породах на линзах водоупорных пластов на сравнительно небольшой глубине от поверхности земли и имеющие в плане ограниченное распространение (рис. 7). Верховодка обычно насыщает различные пористые породы четвертичного возраста — пески, покровные суглинки, лессы и пр. Верховодка также встречается в верхней части коры выветривания скальных пород. Кроме того, она распространена в районах многолетней мерзлоты, где относится к надмерзлотным водам. На территориях городов и на крупных промышленных площадках образованию верховодки способствуют многочисленные понижения, котлованы, техногенные насыпные и намывные грунты. Режим верховодки всецело зависит от количества инфильтрующихся атмосферных осадков, а на застроенных территориях городов и промышленных площадок — загрязненных техногенных вод. Водоупором для верховодки служат нередко линзы морены и выклинивающиеся водонепроницаемые или слабопроницаемые пласты другого генезиса.

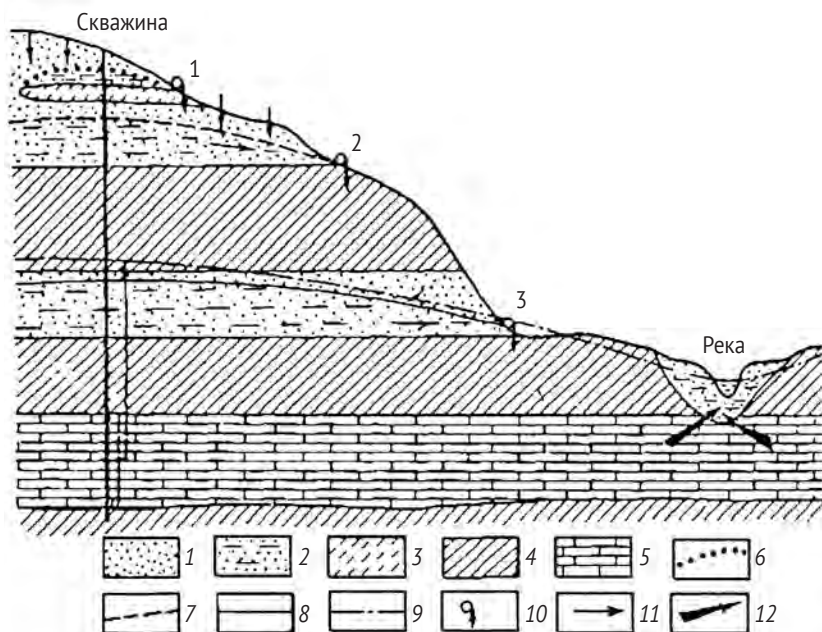


Рис. 7. Схематический гидрогеологический разрез части речной долины с залеганием различных видов подземных вод:

1 – песок; 2 – песок водоносный; 3 – супеси; 4 – глины; 5 – известняки трещиноватые; 6 – уровень верховодки; 7 – уровень грунтовых вод; 8 – уровень межпластовых ненапорных вод; 9 – уровень артезианских вод; 10 – источники нисходящие; 11 – направления движения безнапорных подземных вод; 12 – разгрузка артезианских вод в речной аллювий; 1–3 – источники, расположенные на разных высотах, но все на уровне безнапорного движения грунтовых вод по водоупорному слою

Отличительными признаками верховодки являются: ограниченная площадь распространения; временный характер; резкие колебания уровня, состава и запасов. Воды верховодки обычно пресные, слабоминерализованные, часто бывают загрязнены. Верховодка, как правило, не может служить хорошим источником водоснабжения. Однако при необходимости принимаются меры для искусственного сохранения верховодки: устройство прудов; отводы из рек, обеспечивающие постоянным питанием эксплуатируемые колодцы; насаждение растительности, задерживающей снеготаяние; создание водоупорных перемычек и т. п. В пустынных районах путем устройства канавок на глинистых участках — такырах — атмосферные воды отводятся в прилегающий участок песков, где создается линза верховодки, представляющая собой некоторый запас пресных вод.

**Грунтовые воды** — подземные гравитационные воды первого от поверхности земли постоянно действующего водоносного горизонта, расположенного на первом выдержанном водоупорном слое. Грунтовые воды имеют повсеместное распространение на земном шаре, заключены в рыхлых и в слабосцементированных породах (вода пластового типа) или заполняют трещины в магматических, метаморфических или осадочных сцементированных

породах (вода трещинного типа), залегают в четвертичных отложениях (поровые воды). Большинство грунтовых вод безнапорные, имеют свободную водную поверхность; сплошная кровля из водонепроницаемых пород, как правило, отсутствует.

Грунтовые воды формируются за счет инфильтрации атмосферных осадков и поверхностных вод. Область питания грунтовых вод обычно совпадает с областью распространения водоносного горизонта. Мощность горизонта непостоянна и зависит от свойств водосодержащих пород, расстояния до области разгрузки, интенсивности питания и т. д. Существенное влияние на режим грунтовых вод оказывают метеорологические условия (атмосферные осадки, испарения, температура, атмосферное давление и т. д.), гидравлические условия (изменение режима поверхностных водоемов, питающих или дренирующих подземные воды), хозяйственная деятельность человека (строительство гидротехнических и гидромелиоративных сооружений, откачка воды и нефти из недр, добыча полезных ископаемых, удобрение сельскохозяйственных земель, промышленные стоки и др.) (рис. 8).

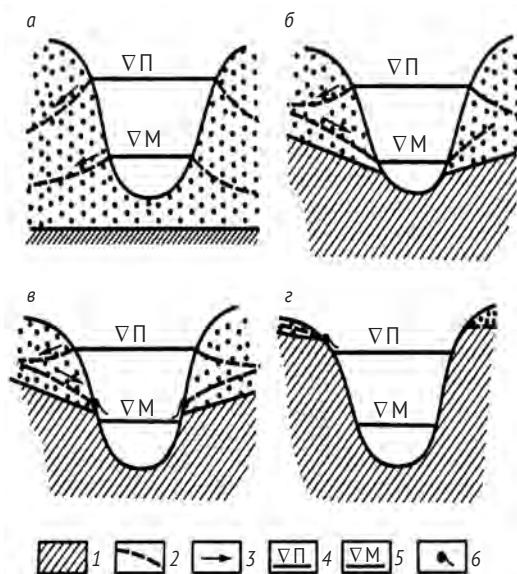


Рис. 8. Схема взаимодействия речных и грунтовых вод:

*а* – постоянная односторонняя гидравлическая связь (река в течение всего года питает грунтовые воды); *б* – постоянная двусторонняя гидравлическая связь (река питает грунтовые воды в половодье и дренирует их в межень); *в* – временная гидравлическая связь; *г* – отсутствие гидравлической связи; 1 – водоупорный пласт; 2 – уровень грунтовых вод; 3 – направление движения грунтовых вод; 4 – уровень воды в реке в половодье; 5 – уровень воды в реке в межень; 6 – источники (родники)

Грунтовые воды наиболее доступны для практического использования, но в то же время они относятся к категории незащищенных вод от загрязнения с поверхности.

Различают следующие типы поровых грунтовых вод: речных долин, ледниковых отложений, степей, полупустынь и пустынь, горных и предгорных областей, песчаных морских побережий.

*Грунтовые воды в речных долинах* приурочены к древним и современным аллювиальным песчано-гравийным, песчаным и песчано-глинистым отложениям. Глубина залегания этих вод от поверхности земли изменяется от 0 до 10–15 м и более. Воды аллювиальных отложений обычно пресные, преимущественно гидрокарбонатные кальциевые, пригодные для водоснабжения. В настоящее время в связи с тотальным ухудшением экологической обстановки грунтовые воды для централизованного водоснабжения населенных пунктов, как правило, не используются. Использование грунтовых вод осуществляется в основном копаными колодцами и неглубокими скважинами для технических нужд.

*Грунтовые воды ледниковых отложений* широко развиты в северных, западных, северо-западных районах европейской части России, в Северной Германии, Польше. Ледниковые отложения в этих районах представлены валунными глинами и суглинками, а также флювиогляциальными песками и галечниками. Пески и галечники слагают озы, камы, зандровые поля и заполняют долины стока талых вод ледника. Ширина долин изменяется от 3 до 25 км, а мощность аллювиально-флювиогляциальных песков и галечников достигает десятков метров. Особенно обширные песчаные поля с большими запасами грунтовых вод развиты в районах Минска, Мытищ. Грунтовые воды района Мытищ долгое время использовались для водоснабжения Москвы; в настоящее время они идут на водоснабжение местных предприятий и некоторых населенных пунктов.

*Грунтовые воды степных, полупустынных и пустынных районов* имеют свои особенности, обусловленные климатом и гидрографией этих районов. Малое количество осадков, слабо развитая гидрографическая сеть, широкое распространение лессовидных пород и сухих песков, высокое испарение обуславливают весьма неблагоприятные условия формирования грунтовых вод. В районах распространения лессовидных пород грунтовые водоносные горизонты залегают глубоко от поверхности, обладают слабой водообильностью, а воды их — повышенной минерализацией.

Грунтовые воды сухих степей и полупустынь (Прикаспийская низменность и др.) залегают на различных глубинах от поверхности и имеют, как правило, высокую минерализацию — непригодны для водоснабжения.

*Грунтовые воды горных областей* связаны с песчано-глинистыми отложениями конусов выноса и предгорных наклонных равнин, аллювиальными образованиями горных рек, породами межгорных котловин, иногда бессточных. Грунтовые воды в горных областях преимущественно пресные, пригодные для водоснабжения: в замкнутых межгорных котловинах — пестрые по химическому составу; в краевых частях котловин грунтовые воды залегают неглубоко от поверхности, являются пресными и широко используются для водоснабжения и орошения. Эксплуатация осуществляется скважинами и колодцами.

**Трещинные грунтовые и напорные воды** — подземные воды, залегающие и циркулирующие в трещиноватых магматических, метаморфических и осадочных породах. Различают три типа трещин по их происхождению: трещины

тектонические, образовавшиеся при формировании геологических структур; трещины выветривания, возникающие при выветривании и размывании горных пород; трещины литогенетические, связанные с формированием пород. Подземные воды различных трещин нередко бывают гидравлически связаны между собой, чем и объясняется во многих случаях пестрота химического состава вод, вскрываемых скважинами в трещиноватых породах или выходящих из них на поверхность в виде источников. Наибольшая трещиноватость, а следовательно, и водообильность приходится на первые 2–3 м зоны выветривания пород; меньшая — характерна для последующих 20–30 м; наконец, слабая трещиноватость и водообильность имеют место в нижней части, достигающей 100–200 м.

**Карстовые грунтовые и напорные воды** — подземные воды, залегающие и циркулирующие в трещинах, пустотах, каналах, пещерах, образовавшихся в результате выщелачивания известняков, доломитов, гипсов, ангидритов и солей. Состав карстующихся пород, гидродинамическая зональность земной коры, химические, биохимические и другие процессы, протекающие в земной коре, определяют химический состав и минерализацию карстовых вод.

Менее минерализованные воды характерны для известнякового карста, более минерализованные — для гипсового, наиболее минерализованные — для соляного карста. *Карстовые воды известняков*, доломитов, мраморов зоны интенсивного водообмена обычно пресные гидрокарбонатные; зоны затрудненного водообмена — минерализованные, сульфатные и хлоридные, зоны весьма затрудненного водообмена — высокоминерализованные соленые воды и рассолы хлоридного состава. *Карстовые воды гипсов* и ангидритов зоны интенсивного водообмена — сульфатные, а в зонах затрудненного и весьма затрудненного водообмена — хлоридные, часто рассольного типа. *Карстовые воды солей* во всех трех зонах соленые хлоридного состава.

Наиболее изучены карстовые воды в Крыму, на Кавказе, в Ленинградской области и Прибалтике, в Тульской, Московской, Воронежской и других областях, в Карпатах, на западном склоне Урала, Уфимском плато, Алтае, по реке Волге, в бассейне реки Лены и многих других районах России и Средней Азии.

**Артезианские воды** — подземные воды, находящиеся в водоносных горизонтах (комплексах), перекрытых и подстилаемых водоупорными пластами, и обладающие напором, который обуславливает подъем уровня воды над их кровлей при вскрытии воды скважинами. При благоприятных геоструктурных и гидрогеологических условиях скважины дают фонтанирующую воду.

Артезианские воды широко распространены в пределах синеклиз, впадин, мульд, краевых и предгорных прогибов моноклинальных структур, а также в межгорных впадинах, синклиналиных прогибах, грабенах и в зонах тектонических разломов, сложенных породами, как правило, дочетвертичного возраста.

Характерные особенности артезианских вод следующие:

- залегают глубже горизонтов грунтовых вод в водоносных горизонтах и комплексах, подстилаемых и перекрытых водоупорными пластами, потому более защищены от поверхностного загрязнения;
- обладают напором, т. е. установившийся уровень в скважине, вскрывшей водоносный горизонт, выше появившегося при бурении;

- область питания и создания напора артезианских вод и область их распространения не совпадают и часто удалены друг от друга на значительные расстояния;
- режим артезианских вод более стабилен: физико-географические факторы оказывают меньшее влияние, пьезометрический уровень мало подвержен сезонным колебаниям, химический состав более стабилен, температура вод возрастает с глубиной.

По условиям залегания артезианских вод выделяют артезианские бассейны. **Артезианский бассейн** — совокупность артезианских водоносных горизонтов и комплексов, приуроченных к отрицательным синклиналим геологическим структурам. В пределах бассейна выделяются три области: питания, разгрузки и напора (рис. 9).

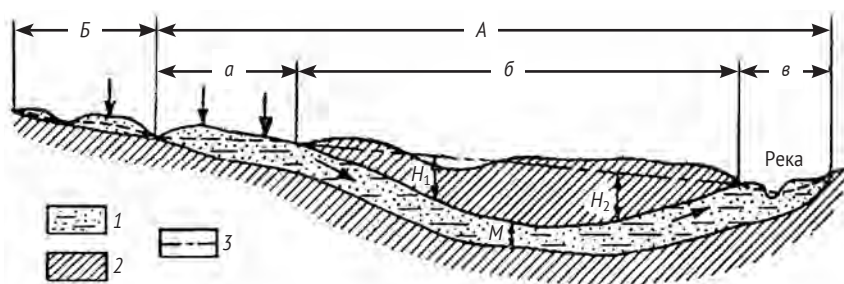


Рис. 9. Схема строения артезианского бассейна (по А. М. Овчинникову):

1 — водоносные породы; 2 — водоупорные породы; 3 — пьезометрический уровень; А — пределы распространения артезианских вод; Б — пределы распространения грунтовых вод; а — область питания напорных вод; б — область распространения напора; в — область разгрузки;  $H_1$  — пьезометрический напор выше поверхности земли, вызывающий фонтанирование скважин;  $H_2$  — пьезометрический напор ниже поверхности земли; М — мощность артезианского водоносного горизонта. Стрелками в пласте показано направление движения артезианских вод

Область питания расположена в приподнятой части бассейна, где выходят на поверхность водоносные горизонты и осуществляется инфильтрация атмосферных осадков. В области разгрузки, приуроченной к наиболее низкой (по рельефу) части артезианского бассейна, происходит разгрузка, дренирование водоносных горизонтов, выходящих на поверхность. Между областями питания и разгрузки водоносные горизонты залегают на более или менее значительной глубине. Это область напора, где распространены напорные воды и осуществляется их сток от областей питания к областям разгрузки.

Артезианские бассейны на территории Земли различны по площади, мощности и возрасту слагающих их горных пород, они встречаются как в платформенных, так и в горно-складчатых областях и районах<sup>15</sup>. Крупные артезианские

<sup>15</sup> Гидрогеология СССР; Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 год»; Киссин И. Г. Вода под землей; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Овчинников А. М. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод.



бассейны обычно имеют сложное строение. Область прогибания, занятая таким бассейном, расчленяется на несколько впадин, к которым приурочены более мелкие артезианские бассейны — бассейны второго порядка. Самый крупный в мире артезианский бассейн — Западно-Сибирский, площадь которого — около 3,5 млн км<sup>2</sup>. Он расположен в пределах Западно-Сибирской равнины, между Уралом на западе, Енисейским кряжем на востоке и Казахским мелкосопочником на юге. Северная окраина бассейна находится под дном Карского моря. На дислоцированном фундаменте залегают осадочные отложения мезокайнозойского возраста, мощность которых увеличивается от периферии к центральным частям бассейна, где достигает 3–4 км, а на севере превышает 5 км. В общей структуре Западно-Сибирского бассейна различают ряд депрессий, к которым приурочены артезианские бассейны второго порядка: Обский, Иртышский, Чулымо-Енисейский и др.

В осадочном чехле бассейна выделяют два водоносных этажа, которые содержат ряд водоносных комплексов, сложенных песчаниками и алевролитами, и разделены мощной толщей глин. Воды верхних комплексов питаются за счет атмосферных осадков на водораздельных пространствах и разгружаются в долинах рек и в котловинах озер. Водоносные комплексы, принадлежащие нижнему этажу, получают питание в периферийных частях бассейна, где эти комплексы залегают на небольшой глубине и не перекрыты глинистой толщей. Местами по периферии бассейна происходит разгрузка вод нижнего этажа в речную сеть. В центральной части бассейна эти воды разгружаются по тектоническим нарушениям, а также посредством затрудненной восходящей фильтрации через толщу глин.

В водоносных комплексах верхнего этажа распространены преимущественно пресные воды, которые используются для водоснабжения. Глубокие водоносные комплексы содержат соленые воды и рассолы с минерализацией до 80 г/л. Большую ценность здесь представляют термальные воды, йодобромные промышленные воды. Встречаются также различные типы минеральных вод, обнаружены и эксплуатируются богатейшие месторождения нефти и газа.

Среди артезианских бассейнов зарубежных стран самый крупный — Большой Артезианский бассейн в Австралии площадью 1,7 млн км<sup>2</sup>. Он расположен в восточной и центральной частях Австралийского континента и приурочен к крупному прогибу кристаллического фундамента, который выполнен осадочными отложениями мощностью до 4 км. Основные водоносные горизонты представлены мезозойскими песчаниками. Западная часть бассейна расположена на пустынной территории, где имеются лишь временные водотоки. Подземные воды здесь используются для водоснабжения и обводнения пастбищ.

### *Условия водообмена, зональность подземных вод*

В процессе круговорота воды в природе происходит постоянное возобновление природных вод, в том числе и подземных. Процесс смены первоначально накопившихся вод поступающими вновь водами называют **водообменом**. Подсчитано, что в круговороте воды на Земле ежегодно участвует более 500 тыс. км<sup>3</sup> воды.

**Интенсивность водообмена подземных вод** различна и зависит от глубины их залегания. По Н. К. Игнатовичу, в верхней части земной коры выделяют следующие вертикальные зоны (рис. 10):

- *зона интенсивного водообмена* (воды преимущественно пресные) расположена в самой верхней части земной коры до глубины 300–400 м, реже — более; подземные воды этой зоны дренируются реками; в масштабе геологического времени — это воды молодые; водообмен осуществляется за десятки и тысячи лет;
- *зона замедленного водообмена* (воды солоноватые и соленые) занимает промежуточное положение и располагается до глубины 600–2000 м; обновление вод в процессе круговорота происходит в течение сотен тысяч лет;
- *зона весьма замедленного водообмена* (воды типа рассолов) приурочена к глубоким зонам земной коры и полностью изолирована от поверхностных вод и атмосферных осадков; водообмен — в течение сотен миллионов лет.

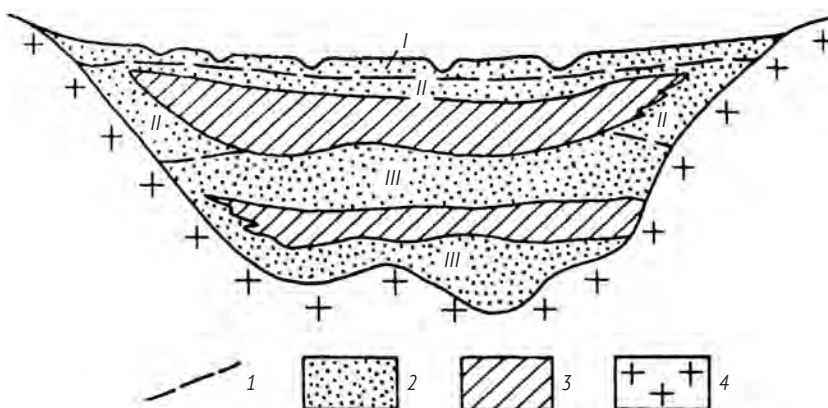


Рис. 10. Схема гидрогеодинамической зональности артезианского бассейна:

- 1 — границы между гидрогеодинамическими зонами: I — интенсивного водообмена, II — затрудненного водообмена, III — весьма затрудненного водообмена; 2 — водоносные горизонты и комплексы чехла артезианского бассейна; 3 — региональные водоупоры; 4 — фундамент и складчатое обрамление артезианского бассейна

Наибольшее значение для водоснабжения имеют подземные воды, циркулирующие в зоне интенсивного водообмена. Постоянно пополняясь атмосферными осадками и водами поверхностных водоемов, они, как правило, отличаются значительными запасами и высоким качеством. Воды двух нижних зон, расположенных до глубины 10–15 км, практически в процессе круговорота не возобновляются, запасы их не пополняются. Ниже глубины 10–15 км вода предположительно находится в парообразном состоянии.

**Вертикальная зональность** подземных вод характеризуется изменением условий водообмена — изменением гидравлических и гидродинамических характеристик; увеличением минерализации и изменением химического состава подземных вод; повышением температуры подземных вод, вплоть до изменения агрегатного состояния. В каждом артезианском бассейне

наблюдается своя гидрогеохимическая зональность, во многом обусловленная интенсивностью водообмена и палеогидрогеологическими условиями формирования напорных вод.

**Месторождение подземных вод** — пространственно оконтуриваемые в пределах водонапорной системы скопления вод определенного состава и в количестве, достаточном для их экономически целесообразного извлечения и использования.

### *Понятие запасов и ресурсов подземных вод и их использования*

Использование артезианских вод возможно только при достаточности их запасов, которые зависят от величины артезианских бассейнов, размеров областей их питания, числа, мощности, фильтрационных свойств водоносных горизонтов, водоотдачи пород, слагающих водоносные горизонты, климатических условий, различных техногенных нагрузок и других факторов, оказывающих влияние на гидродинамический, гидрогеохимический и температурный режим подземных вод<sup>16</sup>.

Под *прогноznыми ресурсами* какой-либо территории понимается количество подземных вод определенного качества и целевого назначения, которое может быть получено в пределах этой территории и отражает потенциальные возможности использования подземных вод. Прогнозные ресурсы питьевых, технических и минеральных подземных вод оцениваются по водоносным горизонтам (комплексам) в пределах артезианских гидрогеологических структур различных порядков (или их частей), речных бассейнов и водоносным горизонтам (комплексам) или водоносным зонам в пределах гидрогеологических складчатых областей.

Под *запасами* понимается объем подземных вод, который может быть получен рациональными в технико-экономическом отношении водозаборными сооружениями при заданном режиме эксплуатации и при качестве воды, удовлетворяющем требованиям в течение всего расчетного срока водопотребления. Запасы представляют собой разведанную и изученную часть прогнозных ресурсов подземных вод. Запасы питьевых, технических и минеральных подземных вод подсчитываются по результатам геологоразведочных работ, выполненных в процессе геологического изучения и оценки предоставленных в пользование участков недр, а также по данным разведки таких участков

<sup>16</sup> Биндеман Н. Н. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. — М. : Гостеолтехиздат, 1963; Боcheвер Ф. М. Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод. — М. : Недрa, 1968; Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология; Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод; Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения; Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод / МПР РФ. — М., 2007; Методические рекомендации по применению Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных вод, утвержденной Приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30 июля 2007 г. № 195; ОСТ 41-05-263-86 «Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре». — М. : ВСЕГИНГЕО, 1986.

недр или эксплуатации действующих водозаборных сооружений для добычи подземных вод.

Объектом подсчета запасов подземных вод является месторождение питьевых, технических и минеральных подземных вод. Объектом оценки прогнозных ресурсов являются водоносные горизонты (комплексы) в пределах артезианских гидрогеологических структур различного порядка, речных бассейнов, водоносные зоны гидрогеологических складчатых областей, фланги месторождений подземных вод, оцененные на основании комплекса благоприятных гидрогеологических предпосылок, обоснованных по результатам региональных гидрогеологических исследований, регионального математического моделирования, балансовых и гидродинамических подсчетов, экспертных оценок с использованием данных геофизических и гидрометрических исследований, гидрогеологического опробования скважин различного назначения.

Запасы артезианских вод определяются по результатам их разведки и опробования. Разведка и эксплуатация артезианских вод осуществляются скважинами различной глубины и конструкции, которые устанавливаются исходя из конкретных гидрогеологических условий района и участка артезианского бассейна.

Подсчет и учет запасов месторождений питьевых, технических и минеральных подземных вод производятся в расходах подземных вод, м<sup>3</sup>/сут, которые могут быть получены на месторождении проектными водозаборными сооружениями при заданном режиме эксплуатации и качестве воды, удовлетворяющем требованиям ее целевого использования в течение расчетного срока эксплуатации (как правило, 25 лет).

Одной из важных предпосылок рационального использования пресных подземных вод является их правильная оценка и дальнейшая эксплуатация. При планировании перспективного использования подземных вод наиболее сложный вопрос — прогноз изменения их качества и количества при длительной эксплуатации. Поэтому разведка месторождений, проектирование новых водозаборов и введение их в эксплуатацию, собственно эксплуатация регламентируются нормативными и методическими документами и осуществляются под контролем со стороны государственных и надзорных органов — обязательное лицензирование той или иной деятельности, выполнение лицензионных условий и государственная статистическая отчетность, прохождение экспертиз и пр. Важное значение имеет ведение государственного мониторинга состояния недр, по результатам которого принимаются экономически целесообразные управляющие решения, в том числе и по дальнейшему развитию водообеспечения населения.

### ***О ведении мониторинга подземных вод и его роли в оценке истощения и загрязнения подземных вод при водоснабжении***

Государственный мониторинг состояния недр (ГМСН) в соответствии с законодательством Российской Федерации является частью государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей

среды) и представляет собой систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки, анализа и обобщения информации с целью оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием природных и техногенных факторов<sup>17</sup>.

В соответствии с положением «О порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр», утвержденным Минприроды России (Приказ № 433 от 21.05.2001) и зарегистрированным Минюстом России (регистрационный № 2818 от 24.07.2001), ведение ГМСН производится *на федеральном уровне по территории РФ, на региональном — по территории федерального округа, на территориальном — по территории субъекта РФ*. По территории субъекта РФ осуществляются ведение полевых работ (наблюдения и измерения на государственной опорной наблюдательной сети, отбор проб подземных вод, специальные гидрогеологические и инженерно-геологические обследования), а также сбор, анализ и обобщение информации о состоянии недр. На региональном уровне происходят сбор, анализ материалов территориального уровня, их систематизация и обобщение в границах федерального округа, подготовка регламентной информационной продукции.

По данным государственного мониторинга состояния недр на территории РФ разведано 20 500 месторождений (участков) питьевых и технических подземных вод, из них находится в эксплуатации 60%. По состоянию на 1 января 2022 г. утвержденные запасы питьевых и технических подземных вод составили 76,49 млн м<sup>3</sup>/сут, из них 18% составляют запасы Московской области (8,87 млн м<sup>3</sup>/сут) и Краснодарского края (4,24 млн м<sup>3</sup>/сут) (рис. 11–13)<sup>18</sup>.

В 2021 г. прирост запасов подземных вод за счет разведки 485 новых месторождений составил 0,60 млн м<sup>3</sup>/сут. Наибольшее количество запасов оценено в Оренбургской (0,09 млн м<sup>3</sup>/сут по 14 месторождениям (участкам)) и Московской (0,08 млн м<sup>3</sup>/сут по 41 месторождению (участку)) областях.

По результатам завершенных в 2021 г. геологоразведочных работ, осуществленных за счет средств федерального бюджета, выполнена оценка запасов подземных вод для обеспечения водоснабжения населения пгт. Октябрьский (Архангельская область), г. Томари (Сахалинская область), с. Верхневилуйск (Республика Саха (Якутия)).

*Учет добычи, извлечения и использования подземных вод* основан на анализе и обобщении статистической отчетности недропользователей (4-ЛС), данных из отчетов недропользователей по ведению мониторинга в рамках действующих лицензий, материалов обследования водозаборов и других документов.

В 2021 г. на территории РФ водоотбор из подземных водных объектов составил 21,42 млн м<sup>3</sup>/сут, в том числе добыча на водозаборах — 16,42 млн м<sup>3</sup>/сут, извлечение без дальнейшего использования при разработке месторождений полезных ископаемых и иных видов недропользования, не связанных с добычей

<sup>17</sup> Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 году» / ФГБУ «Гидроспецгеология». — М., 2022. — Вып. 45.

<sup>18</sup> Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 году»; Справочное издание Водный кадастр...

полезных ископаемых, — 5,00 млн м<sup>3</sup>/сут. На эксплуатирующихся 12 264 месторождениях (участках) подземных вод добыча составила 60 % от общего водоотбора, или 78 % от объема добычи. Общее количество действовавших водозаборов в 2021 г. по территории РФ — 55 922.

Наибольшее количество подземных вод отбирается на территории ЦФО — 24 % от общего отбора по России. Основной объем извлечения подземных вод (33 %) приходится на Сибирский федеральный округ.

Наибольшая эксплуатационная нагрузка на подземные воды отмечается в пределах Центрального (Москва, Московская область) и Северо-Кавказского (Республика Северная Осетия-Алания) федеральных округов. Менее интенсивно питьевые и технические подземные воды осваиваются в Северо-Западном, Уральском, Сибирском и Дальневосточном округах, где значение модуля добычи и извлечения в целом по округу не превышает 3 м<sup>3</sup>/(сут·км<sup>2</sup>).

В экономике и социальной сфере на территории РФ в 2021 г. было использовано 97 % от общего количества добытой воды. В сравнении с 2020 г. потребление подземных вод возросло на 0,99 млн м<sup>3</sup>/сут (~6 %).

Распределение по видам использования подземных вод следующее: питьевые и хозяйственно-бытовые нужды — 73 %; техническое водоснабжение — 23 %; на иные цели, включая нужды сельского хозяйства, орошение земель и обводнение пастбищ, — 4 %.

Удельное водопотребление на питьевые нужды населения (использование подземных вод в расчете на одного человека в сутки) в 2021 г. в целом по России составило 80 л/(сут·чел.). Наибольшее удельное водопотребление в ЦФО — 100 л/(сут·чел.), наименьшее — в Северо-Западном федеральном округе — 34 л/(сут·чел.). Сброс вод без использования составил 26 % от общего объема добычи и извлечения подземных вод.

Таким образом, состояние ресурсной базы питьевых и технических подземных вод в 2021 г. не претерпело существенных изменений. Оцененные запасы питьевых и технических подземных вод за 2021 г. в целом по территории России сохранились на уровне 2020 г. и составили 76,49 млн м<sup>3</sup>/сут.

*Гидрохимическое состояние подземных вод* в естественных условиях зависит от основных природных закономерностей их формирования и в региональном масштабе в течение года практически не меняется. Под воздействием техногенных факторов происходит локальное изменение гидрохимического состояния подземных вод, выражающееся в их загрязнении. В наибольшей степени подвержены загрязнению грунтовые воды и напорные воды первых от поверхности водоносных горизонтов, имеющие тесную гидравлическую связь с поверхностными водами.

Загрязнение подземных вод рассматривается относительно требований к качеству вод питьевого назначения, которое определяется СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». По состоянию на 1 января 2022 г. на территории России, по данным ГМСН, постоянное или эпизодическое загрязнение подземных вод было отмечено на 2730 водозаборах питьевого и хозяйственно-бытового назначения, преимущественно

представляющих собой одиночные эксплуатационные скважины с производительностью менее 1,0 тыс. м<sup>3</sup>/сут. В 2021 г. загрязнение подземных вод было впервые выявлено на 116 водозаборах и по 603 водозаборах ранее выявленное загрязнение подземных вод подтвердилось.

Наибольшую опасность представляет загрязнение подземных вод на водозаборах питьевого и хозяйственно-бытового назначения компонентами 1-го класса опасности, которое в 2021 г. было выявлено по отдельным водозаборным и наблюдательным скважинам на 31 водозаборе.

Среди загрязняющих компонентов 1-го класса опасности наиболее часто встречается мышьяк, по единичным пробам в скважинах фиксировались бериллий и ртуть. Как правило, загрязнение подземных вод этими компонентами носит случайный (реже периодический) характер, и интенсивность его в основном не превышает 5 ПДК.

Практически повсеместно загрязнение проявляется в районах промышленных и городских агломераций, там обнаруживается практически весь перечень выявленных загрязняющих веществ, как неорганических, так и органических; при сельскохозяйственном типе загрязнения наблюдаются преимущественно соединения азота, пестициды; при коммунальном типе загрязнения — соединения азота, железо, марганец, хлориды, фенолы; при загрязнении некондиционными природными водами — хлориды, сульфаты, железо, марганец, фтор, стронций.

Информация, полученная об изменениях состояния подземных вод — уровня, химического состава, температуры, позволяет проанализировать, выявить причины и тенденцию этих изменений, а следовательно, принять необходимые меры по улучшению обстановки.

Большой вклад в изучение подземных вод региона вносит система государственного мониторинга состояния недр, в рамках которой в течение многих десятков лет производятся сбор, систематизация и анализ данных по эксплуатации подземных вод, гидрорежимные наблюдения, гидрогеохимические исследования и обследование водозаборов на территории Москвы и Московской области.

### *Пример территориального мониторинга подземных вод Московского региона (Москвы и Московской области)<sup>19</sup>*

Гидрогеологические условия Московского региона определяются его расположением на юго-западном склоне Московского артезианского бассейна, представляющего собой систему водоносных и относительно водоупорных горизонтов и комплексов. В обводненной толще пород по гидрогеодинамическим и гидрогеохимическим признакам выделяются две зоны: активного и затрудненного водообмена.

<sup>19</sup> Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 год»; О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области : Информационные выпуски за 2011–2015 гг. — 2012–2016.



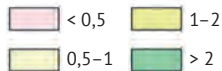
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ**  
**ФГБУ "Гидроспещеология"**  
**КАРТА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И СТЕПЕНИ ИХ ОСВОЕНИЯ**  
**НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**(по состоянию на 01.01.2022)**

Составитель: Дежникова И.Ю.  
 Компьютерное исполнение: Марфин С.М.  
 2022 г.

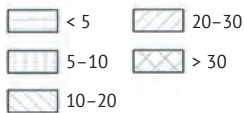


Условные обозначения:

1. Запасы подземных вод, млн м³/сут



2. Степень освоения запасов подземных вод, %

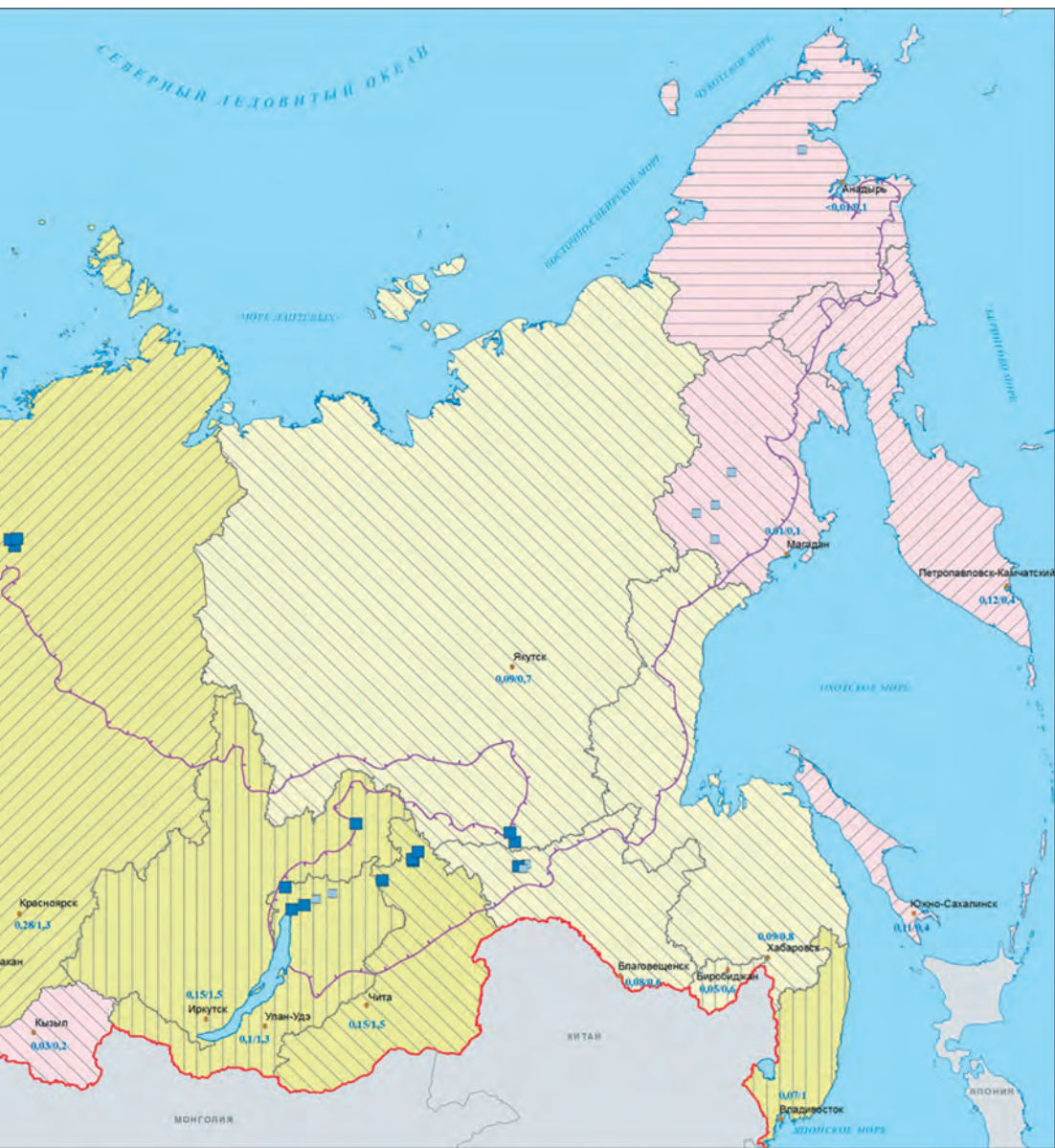


3. Цифры на карте, млн м³/сут  
 (по субъектам Российской Федерации)

0,37/1,47 в числителе – добыча подземных вод на месторождениях (участках), в знаменателе – запасы подземных вод

Рис. 11. Карта запасов питьевых и технических на территории Российской Федерации (по состоянию





4. Месторождения подземных вод в зоне сплошного распространения многолетне-мерзлых пород с запасами, млн м<sup>3</sup>/сут

■ 0,01-0,03    ■ >0,03

5. Границы

- Российской Федерации
- субъектов Российской Федерации
- области сплошного распространения многолетне-мерзлых пород

6. Прочие обозначения

- Центры субъектов Российской Федерации
- Зарубежные государства

подземных вод и степени их освоения на 1 января 2022 г.) по данным ФГБУ «Гидроспецгеология»



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЮ  
ФГБУ "Гидрогеология"

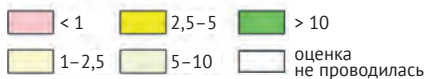
КАРТА ЗАПАСОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И СТЕПЕНИ ИХ  
ОСВОЕНИЯ ПО ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИМ СТРУКТУРАМ  
ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(по состоянию на 01.11.2022)

Составитель: Дежникова И.Ю.  
Компьютерное исполнение: Марфин С.М.  
2022 г.

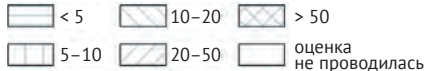


Условные обозначения:

1. Запасы подземных вод, млн м<sup>3</sup>/сут



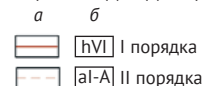
2. Степень освоения запасов подземных вод, %



3. Цифры на карте, млн м<sup>3</sup>/сут

0,37/1,47 в числителе – добыча подземных вод на месторождениях (участках), в знаменателе – запасы подземных вод

4. Границы (а) и (б) гидрогеологических структур



II Сифский САБ	al-A Азово-Кубанский АБ	al-B Восточно-Предкавказский АБ	al-B Ленинградский АБ	al-В Эргенинский АБ	el-Г Донецкая ГСО	III Восточно-Европейский САБ	al-A Балтийско-Польский АБ	al-B Северо-Двинский АБ	al-B Ленинградский АБ	al-Т Московский АБ	al-Д Ветлужский АБ	al-Е Волго-Сурский АБ	al-Ж Приволжско-Хоперский АБ	al-З Сыртовский АБ	al-И Камско-Вятский АБ	al-K Днепровско-Донецкий АБ	al-Л Предуральский ПАЕ	al-М Прикаспийский АБ	III Тимано-Печорский САБ	eIII-A Канино-Тиманская ГСО	al-B Печорский АБ	al-В Печоро-Предуральский ПАБ	IV Западно-Сибирский САБ	al-V Иртыш-Обский АБ	al-В Тазовско-Пурский АБ	V Сибирский САБ	aV-A Ангаро-Ленский АБ	aV-B Якутский АБ	aV-В Тулунский АБ	aV-Г Оленекский АБ	aV-Д Хатангский АБ	hVI Балтийский СГМ	hVII Анабарский СГМ	hVIII Алдано-Становой СГМ	eVIII-A Алданская ГСО	eVIII-B Становая ГСО	gIX Байкало-Витимская ГСО	dIX-A Байкало-Патомский ГМ	dIX-B Байкало-Муйская ГСО	dIX-В Хамардабан-Баргузинская ГСО	dIX-Г Джиджа-Витимская ГСО	dIX-Д Малхано-Становая ГСО	gX Монголо-Охотская ГСО	eX-A Восточно-Забайкальская ГСО	eX-B Амуро-Охотская ГСО	eX-В Верхнеамурская ГСО	gXI Алтае-Саянская ГСО	dXI-A Алтае-Томский ГМ
----------------	-------------------------	---------------------------------	-----------------------	---------------------	-------------------	------------------------------	----------------------------	-------------------------	-----------------------	--------------------	--------------------	-----------------------	------------------------------	--------------------	------------------------	-----------------------------	------------------------	-----------------------	--------------------------	-----------------------------	-------------------	-------------------------------	--------------------------	----------------------	--------------------------	-----------------	------------------------	------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	---------------------------	-----------------------	----------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	-----------------------------------	----------------------------	----------------------------	-------------------------	---------------------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------	------------------------

Рис. 12. Карта запасов питьевых и технических подземных вод территории Российской Федерации (по состоянию



5. Индексы и наименования гидрогеологических структур (Перечень объектов гидрогеологического районирования территории Российской Федерации, протокол №18/83-пр. от 07.02.2012 г.)

6. Месторождения подземных вод в зоне сплошного распространения многолетне-мерзлых пород с запасами, млн м<sup>3</sup>/сут

■ 0,01–0,03 ■ >0,03

- |   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| eXI-B Горно-Алтайская ГСО                 | gXIV Курльская СГСО                 |
| eXI-B Саяно-Тувинская ГСО                 | gXV-А Сахалинская СГСО              |
| eXI-Г Саяно-Тувинская ГСО                 | gXV-А Западно-Сахалинская ГСО       |
| eXI-Д Восточно-Саянская ГСО               | gXVI Восточно-Сахалинская ГСО       |
| eXI-E Енисейская ГСО                      | gXVI Таймыро-Североземельская СГСО  |
| gXII Сихотэ-Алинская СГСО                 | gXVII Лаптевская СГСО               |
| eXII-A Малохингано-Ульбано-Баджалская ГСО | gXVIII Новосибирско-Чукотская СГСО  |
| eXII-B Центрально-Сихотэ-Алинский ГМ      | gXIX Верхояно-Колымская СГСО        |
| eXII-Г Восточно-Сихотэ-Алинская ГСО       | gXX Кольмо-Омолонская СГСО          |
| gXIII Корякско-Камчатская СГСО            | gXXI Охотско-Чукотская СГСО         |
| eXIII-A Корякско-Анадырская ГСО           | gXXII Уральская СГСО                |
| eXIII-B Камчатская ГСО                    | dXXII-A Западно-Уральский ГМ        |
|   | dXXII-B Центрально-Уральский ГМ     |
|   | eXXII-B Тагильно-Магнитогорская ГСО |
|   | eXXII-Г Восточно-Уральская ГСО      |
|   | gXXIII Пайхой-Новоземельская СГСО   |
|   | gXXIV Кавказская СГСО               |
|   | eXXIV-A Большешевкавская ГСО        |
|   | dXXIV-B Центрально-Кавказский ГМ    |

Сокращения типов гидрогеологических структур

- АБ артезианский бассейн  
 ГСО гидрогеологическая складчатая область  
 САБ сложный артезианский бассейн  
 СГСО сложная гидрогеологическая складчатая область  
 ГМ гидрогеологический массив  
 ПАБ предгорный артезианский бассейн

7. Прочие обозначения

- Центры субъектов Российской Федерации
- Граница Российской Федерации
- Зарубежные государства
- Граница области сплошного распространения многолетне-мерзлых пород

и степени их освоения по гидрогеологическим структурам на 1 января 2022 г.) по данным ФГБУ «Гидроспецгеология»

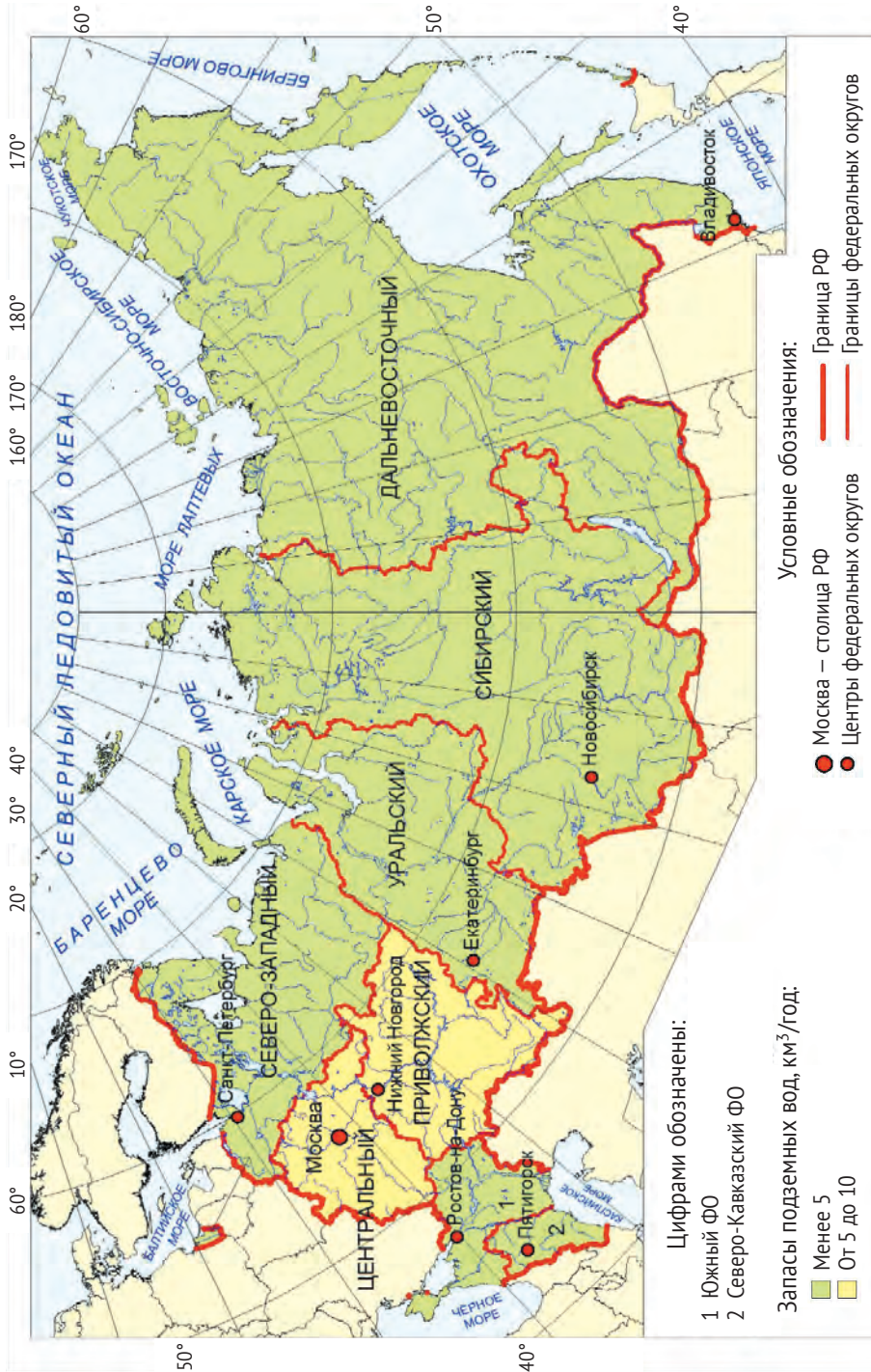


Рис. 13. Запасы подземных вод по федеральным округам Российской Федерации по данным ежегодного справочного издания Водного кадастра РФ «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество» за 2020 г.

Верхняя зона активного водообмена содержит преимущественно пресные воды с минерализацией (в естественном состоянии) до 1 г/л и характеризуется активной связью с поверхностными водами и атмосферными осадками. Зона затрудненного водообмена характеризуется замедленным движением подземных вод, отсутствием связи с речной сетью и атмосферными явлениями. Минерализация этих вод увеличивается с глубиной от 1,5 г/л до 260,0 г/л.

Верхняя часть зоны активного водообмена в пределах Московского региона представлена мезокайнозойскими (современными, четвертичными, меловыми, юрскими) и каменноугольными образованиями, слагающими систему в различной степени взаимосвязанных водоносных горизонтов и комплексов. По условиям водообмена эти водоносные горизонты и комплексы можно условно объединить в два гидрогеологических этажа, разделенных верхнеюрским водоупором. Верхний — мезокайнозойский гидрогеологический этаж — сложен рыхлыми образованиями различного генезиса, нижний — каменноугольный — терригенно-карбонатными образованиями морского генезиса. Верхний этаж содержит, как правило, безнапорные грунтовые воды, нижний — в основном напорные подземные воды.

*Верхний мезокайнозойский гидрогеологический этаж* объединяет в своем составе водоносные горизонты и комплексы современных, четвертичных, меловых и верхнеюрских образований. Подземные воды, содержащиеся в мезокайнозойских отложениях в основном безнапорные грунтовые, подверженные загрязнению, потому практически не используются для питьевых целей в хозяйстве региона. Однако некоторые сельские населенные пункты используют грунтовые воды для локального местного водоснабжения с помощью копанных колодцев, каптированных родников, реже — буровых скважин.

Питание гидрогеологических подразделений верхнего гидрогеологического этажа осуществляется за счет:

- инфильтрации атмосферных осадков;
- техногенных вод на застроенных территориях (утечки по сетям водонесущих коммуникаций — водопровод, канализация, теплотрассы; утечки на сооружениях водопотребляющих производств — ТЭЦ, насосные станции водопровода и канализации, градирни и др.; полив зеленых насаждений, мытье улиц и т. п.);
- инфильтрации и подпертой фильтрации из прудов и рек.

Инфильтрационное питание грунтовых вод происходит на большей части площади их распространения. Исключение составляют участки, в основном в долинах рек, где в структуре водного баланса преобладают разгрузка в реки и испарение с поверхности неглубоко залегающих грунтовых вод. Интенсивность инфильтрационного питания меняется по площади в зависимости от ландшафтных условий и глубины залегания поверхности грунтовых вод.

Разгрузка осуществляется в водотоки и водоемы путем испарения, а также перетеканием в нижележащие водоносные горизонты каменноугольных отложений.

Глубина дренирования подземных вод определяется врезом местной эрозийной сети и составляет 100–200 м. На плоских водоразделах с молодой

эрозионной сетью, врезанной на 25–75 м, и на обширных заболоченных низменностях со слабым (до 25 м) врезом долин (Мещерская низменность) глубина дренирования не превышает 100 м. По склонам возвышенностей с интенсивно развитой эрозионной сетью и врезами до 100–125 м (Клинско-Дмитровская гряда, Смоленско-Московская возвышенность) дренирующее воздействие рек распространяется до глубины 150–200 м. Это определяет направление движения подземных вод в каменноугольных отложениях к долинам рек — Верхней Волги, Клязьмы, Москвы-реки и Оки.

Грунтовые воды залегают на глубине от нескольких сантиметров до 20–30 м в зависимости от геоморфологических условий, степени дренированности, условий инфильтрационного питания и оттока подземных вод. Зона аэрации представлена преимущественно песчаными, песчано-глинистыми аллювиальными и водно-ледниковыми отложениями в пределах пониженных равнин и моренными суглинками и глинами — на возвышенных участках территории.

Соотношение уровней водоносных горизонтов в естественных условиях подчиняется общей закономерности: на междуречных пространствах пьезометрические уровни более глубоких горизонтов располагаются ниже уровней вышележающих горизонтов, в речных долинах наблюдается обратное соотношение. Таким образом, на междуречных пространствах имеется возможность нисходящего движения подземных вод из верхних горизонтов в нижние, а в долинах — возможность разгрузки вод нижних горизонтов в вышележащие и в русла рек.

Строение мезокайнозойских отложений, являющихся перекрывающей толщей залегающих ниже пород, весьма сложное и разнообразное, в связи с чем значительно различаются условия питания и степень защищенности каменноугольных водоносных горизонтов и комплексов.

*Нижний каменноугольный гидрогеологический этаж* объединяет в своем составе водоносные горизонты и комплексы верхне-, средне- и нижнекаменноугольных отложений, воды которых интенсивно используются для водоснабжения населения и предприятий области. Выделяют следующие основные продуктивные водоносные подразделения:

- гжельско-ассельский водоносный комплекс  $C_3g-P_1a$ ;
- касимовский водоносный комплекс  $C_3ksm$ ;
- подольско-мячковский водоносный горизонт  $C_2pd-mc$ ;
- каширский водоносный комплекс  $C_2ks$ , включающий в себя
- алексинско-протвинский водоносный комплекс  $C_1al-pr$ .

Распространение и условия залегания основных водоносных горизонтов и комплексов карбонатных каменноугольных отложений (карбона) на территории Московского региона имеют свою специфику. Они характеризуются общим наклоном пластов, увеличением мощности и напоров в северо-восточном направлении (рис. 14, 15). Преобладание в разрезе трещиноватых и карвернозных известняков и доломитов, с достаточно выдержанными прослоями мергелей и глин, определяет наличие многоэтажной водонапорной системы с трещинно-пластовыми и карстово-пластовыми водами. Каменноугольные водоносные горизонты и комплексы в верхней и краевой частях их распространения содержат преимущественно пресные гидрокарбонатные кальциевые

и магниевые-кальциевые воды. При погружении в северо-восточном направлении условия водообмена осложняются, возрастает минерализация и изменяется химический состав подземных вод.



Рис. 14. Схема распространения основных (продуктивных) водоносных горизонтов и комплексов на территории Московского региона

### **Особенности эксплуатации подземных вод на территории Московского региона**

В Москве в настоящее время хозяйственно-питьевое водоснабжение (ХПВ) городских территорий почти на 99% осуществляется за счет поверхностных вод из двух независимых источников: Волжского и Москворецкого, на базе которых построена сеть водохранилищ. Доля использования подземных вод в общем балансе ХПВ Москвы мала и составляет около 1%<sup>20</sup>. Добыча подземных вод осуществляется из каменноугольных горизонтов и комплексов в основном для водоснабжения отдельных предприятий; кроме того, значительная часть извлеченных вод приходится на водопонижающие мероприятия (шахтный и дренажный водоотлив) в строительстве и при эксплуатации инженерных сооружений и метрополитена и в дальнейшем не используется.

<sup>20</sup> Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 году».





## Условные обозначения:

	Водоносный четвертичный комплекс; пески, супеси, суглинки		Граница гидрогеологических подразделений
	Водоносный сеноман-сантонский (надпарамоновский) комплекс; пески, алевролиты, опоки		Граница различного литологического состава водовмещающих пород
	Водоупорный верхнеальбский (парамоновский) горизонт; глины		Граница огипсованности пород
	Водоносный волжско-альбский комплекс; пески с прослоями алевролитов, алевролиты		Граница зоны пресных вод
	Водоупорный келловей-кимериджский горизонт; глины		
	Слабоводоносный бат-келловейский горизонт; пески с прослоями алевролитов, глины углефицированные, пирит		
	Водоупорный татарский горизонт; глины пестроцветные, огипсованные, с прослоями мергелей, песчаников, песков		
	Водоносный кузовско-ассельский горизонт; известняки, доломиты		
	Водоупорный маглинковский горизонт; глины, мергели		
	Водоносный турбьевский горизонт; известняки, доломиты		
	Водоупорный целковский горизонт; глины, мергели		
	Водоносный касимовский горизонт; известняки, доломиты, мергели		
	Водоупорный кривякинский горизонт; глины, мергели		
	Водоносный подольско-мячковский горизонт; известняки, доломиты		
	Водоупорный подольско-мячковский (лопасненско-смевиновский) горизонт; глины, мергели		
	Водоносный каширский горизонт; известняки, доломиты, мергели с прослоями глины		
	Водоупорный верейский горизонт; глины		
	Слабоводоносный азовский комплекс; пески, супеси, суглинки, глины		
	Водоносный протвинский горизонт; доломиты, известняки окремненные		
	Водоупорный стешевский горизонт; глины, мергели		
	Водоносный михайловско-тарусский горизонт; известняки, доломиты с прослоями мергелей		
	Водоупорный михайловский горизонт; глины, мергели		

## IV Прочие знаки

- 
- 
- 
- 

## V Литологический состав пород

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

## II Показатели водообмена

- 
- 
- 
- 

## III Минерализация и химический состав

- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

Рис. 15. Схематический геолого-гидрогеологический разрез по линии: Пушино – Домодедово – Москва – Мытищи – Старая Хотча – Белый Городок

По состоянию на 1 января 2023 г. количество извлеченной воды составило 255,66 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в том числе на участках с разведанными запасами — 149,99 тыс. м<sup>3</sup>/сут, при этом на водоотлив (сброс без использования) — 75,15 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

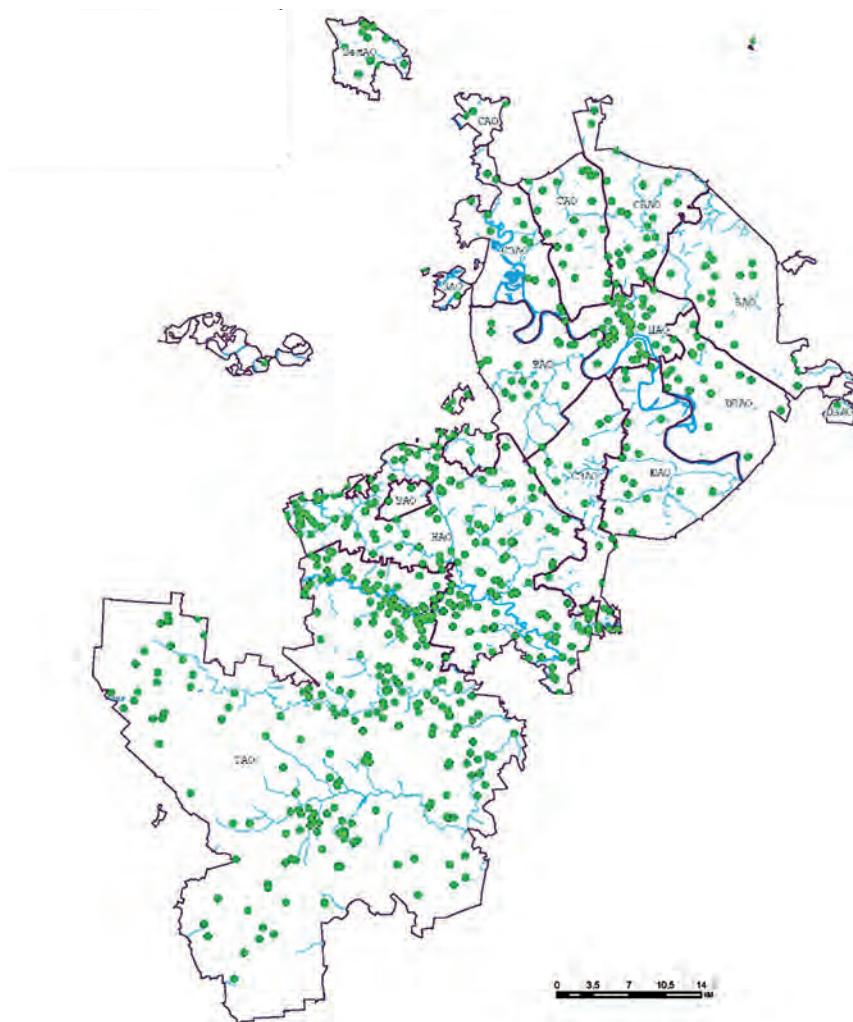
В Москве 691 недропользователь, они владеют 976 водозаборными устройствами (ВЗУ), состоящими из 1685 скважин. По данным ведения мониторинга подземных вод (в основном по отчетности недропользователей), добыча производится 638 ВЗУ, состоящими из 1075 скважин (рис. 16).

Химический состав подземных вод в Москве в настоящее время характеризуется значительной пестротой, высокими концентрациями в водах компонентов техногенного происхождения, превышающими ПДК, а также повышенным содержанием природных компонентов, образовавшихся вследствие интенсивного выщелачивания и растворения водовмещающих пород.

Сложная гидрогеохимическая обстановка на территории мегаполиса предопределена неравномерностью техногенных нагрузок и неоднородностью геолого-гидрогеологических условий территории Москвы как в плане, так и в разрезе. В центральной части города на площади современных долин рек Москвы и Яузы отмечается участок размыва юрских глин, совпадающий с обширной погребенной долиной субширотного направления, прослеживающейся на всей территории Москвы. Этот участок служит сквозным гидрогеологическим «окном» и является наиболее уязвимым с точки зрения защищенности подземных вод каменноугольных водоносных комплексов от поверхностного загрязнения. Конфигурация гидрогеологического «окна» и границы выклинивания касимовского водоносного комплекса делают возможным загрязнение нижележащего подольско-мячковского водоносного горизонта, карбонатные водовмещающие породы которого подстилают песчаные образования погребенной долины. Кроме того, в Москве в подавляющем большинстве случаев нет возможности для организации зон санитарной охраны водозаборов.

Исходя из результатов многолетних регулярных химических анализов можно констатировать, что подземные воды каменноугольных водоносных подразделений в пределах Москвы (не считая присоединенных в 2012 г. новых территорий) не удовлетворяют нормам питьевого водоснабжения по целому ряду показателей органолептических и токсических химических веществ<sup>21</sup>. Тем не менее подземные воды каменноугольных отложений являются единственным защищенным источником водоснабжения, и в условиях чрезвычайных ситуаций могут быть использованы для хозяйственно-питьевых целей после определенного вида водоподготовки. Для этого ведется контроль оценки качества подземных вод в современных условиях.

<sup>21</sup> СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».



Условные обозначения:

I Водозаборы питьевых и технических подземных вод (цвет внутри знака):

● Действующие водозаборы подземных вод

II Границы

□ Административная граница

III Прочие обозначения

~ Реки

○ Озера, водохранилища

Рис. 16. Карта водозаборов питьевых и технических подземных вод территории Москвы (по данным ведения территориального мониторинга подземных вод по Москве и Московской области)

Водоотбор по гидрогеологическим подразделениям осуществляется неравномерно, основная нагрузка приходится на подольско-мячковский водоносный горизонт (54%), остальная нагрузка распределяется следующим образом:

- четвертичный водоносный комплекс — 0,01 тыс. м<sup>3</sup>/сут;
- гжельско-ассельский водоносный комплекс — 0,45 тыс. м<sup>3</sup>/сут;
- касимовский водоносный комплекс — 80,48 тыс. м<sup>3</sup>/сут (32%);
- подольско-мячковский водоносный горизонт — 138,75 тыс. м<sup>3</sup>/сут (54%);
- каширский водоносный комплекс — 6,64 тыс. м<sup>3</sup>/сут (3%);
- совмещенные водоносные комплексы верхне-среднекаменноугольных отложений — 3,60 тыс. м<sup>3</sup>/сут (1%);
- алексинско-протвинский водоносный комплекс — 25,73 тыс. м<sup>3</sup>/сут (10%) (рис. 17).

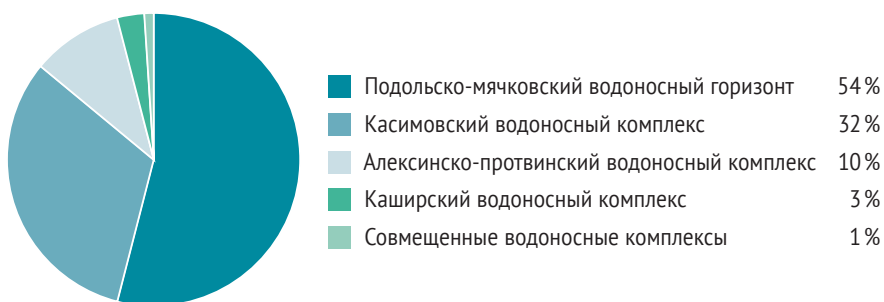


Рис. 17. Соотношение водоотбора по основным водоносным горизонтам и комплексам, эксплуатируемым на территории Москвы по состоянию на 1 января 2023 г. (по данным ведения территориального мониторинга подземных вод по Москве и Московской области)

В Московской области для питьевого, хозяйственно-бытового и технического водоснабжения населения, предприятий и организаций используются преимущественно подземные воды. Водоснабжение Московской области базируется в основном на подземных водах и составляет около 90% от общего водопотребления. По состоянию на 1 января 2023 г. количество извлеченной воды составило 2287,53 тыс. м<sup>3</sup>/сут, в том числе на участках с разведанными запасами — 1751,96 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Количество недропользователей в Московской области составляет 4712, они владеют 8112 водозаборными устройствами (ВЗУ), состоящими из 14 360 скважин, из них 6211 ВЗУ (9839 скважин) — с водоотбором (рис. 18).

Водоотбор по гидрогеологическим подразделениям Московской области распределяется следующим образом:

- мезокайнозойский водоносный комплекс в четвертичных, меловых, верхнеюрских отложениях — 6,35 тыс. м<sup>3</sup>/сут (< 1%);
- гжельско-ассельский водоносный комплекс — 305,43 тыс. м<sup>3</sup>/сут (13%);
- касимовский водоносный комплекс — 499,13 тыс. м<sup>3</sup>/сут (22%);
- подольско-мячковский водоносный горизонт — 907,54 тыс. м<sup>3</sup>/сут (40%);

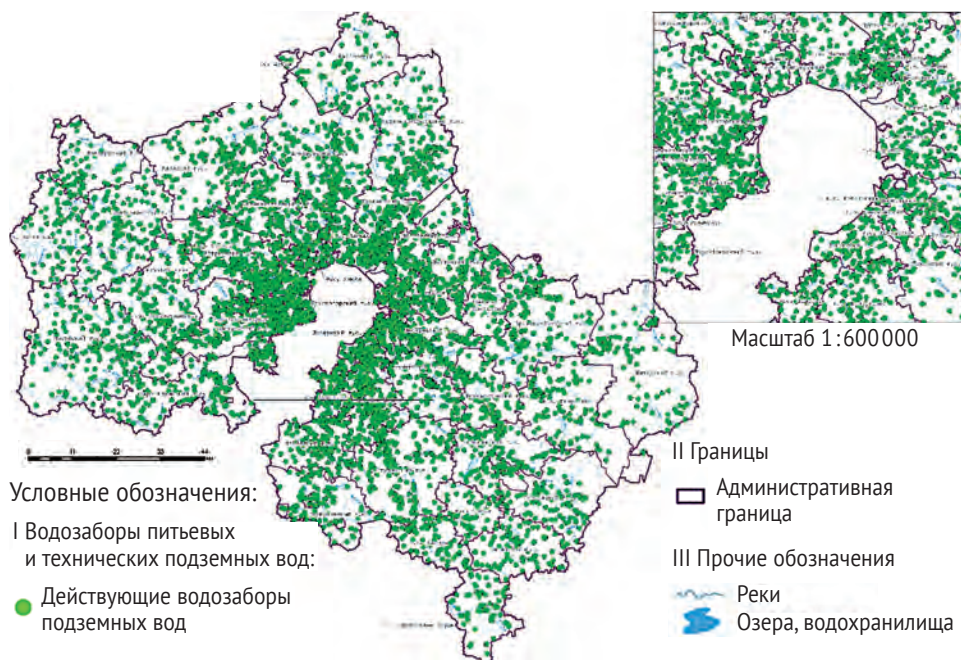


Рис. 18. Карта водозаборов питьевых и технических подземных вод на территории Московской области (по данным ведения территориального мониторинга подземных вод по Москве и Московской области)

- каширский водоносный горизонт — 147,61 тыс. м<sup>3</sup>/сут (7%);
- совмещенные водоносные комплексы верхне-средне-нижнекаменно-угольных отложений — 123,56 тыс. м<sup>3</sup>/сут (5%);
- алексинско-протвинский водоносный комплекс — 297,91 тыс. м<sup>3</sup>/сут (13%) (рис. 19).



Рис. 19. Соотношение объемов водоотбора по основным водоносным горизонтам и комплексам, эксплуатируемым на территории Московской области по состоянию на 1 января 2023 г. (по данным ведения территориального мониторинга подземных вод по Москве и Московской области)

### *Гидрогеодинамическое состояние подземных вод на территории Московского региона*

Длительная интенсивная эксплуатация подземных вод привела к изменению гидрогеологической обстановки, выражающейся в снижении уровня подземных вод и образовании депрессионных воронок, истощении ресурсов водоносных горизонтов на отдельных участках, изменении условий питания водоносных горизонтов и их взаимосвязи между собой, изменении химического состава и качества подземных вод, температурного режима водоносных горизонтов. Территория с нарушенным режимом подземных вод охватывает полностью Московский регион<sup>22</sup>.

Для оценки современной гидрогеологической ситуации и перспектив увеличения водоотбора подземных вод производятся предварительные гидрогеодинамические расчеты на региональной геофильтрационной модели Московского региона, созданной ОАО «Геоцентр-Москва» совместно с ЗАО «Геолинк-Консалтинг» и ЗАО «ГИДЭК» в рамках региональной переоценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод центральной части Московского артезианского бассейна (2002 г.). В настоящее время при ведении государственного мониторинга состояния недр Москвы и Московской области данная модель постоянно пополняется и корректируется, широко применяется в работах по оценке запасов подземных вод, при расчетах зон санитарной охраны водозаборов и других специальных гидрогеологических работах.

В результате многолетнего интенсивного водоотбора во всех эксплуатируемых водоносных горизонтах и комплексах каменноугольных отложений сформировалась региональная депрессия уровней подземных вод. По эксплуатируемым горизонтам и комплексам депрессионная воронка имеет разные границы, при этом существует общая тенденция расширения ее площади от верхних горизонтов к нижним — максимальные размеры воронки отмечаются в алексинско-протвинском водоносном комплексе (рис. 20).

Конфигурация и глубина воронки в каждом из водоносных горизонтов определяются интенсивностью эксплуатации как самого горизонта, так и ниже лежащих, а особенно вышележащих, горизонтов. Московская область находится на юго-западном склоне Московского артезианского бассейна, в региональной области питания подземных вод каменноугольных отложений, погружающихся в северо-восточном направлении. В целом увеличение площади региональной депрессионной воронки от верхних горизонтов к нижним связано с перехватом естественного питания нижних горизонтов эксплуатационным водоотбором верхних горизонтов.

В результате интенсивной эксплуатации напорных водоносных горизонтов и комплексов каменноугольных отложений в течение многолетнего периода уровень подземных вод на некоторых участках упал ниже их кровли, образовались зоны безнапорного режима фильтрации (рис. 21). В естественных условиях безнапорный режим в водоносных горизонтах карбона существовал только

<sup>22</sup> О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области...

в областях их выхода на поверхность (под четвертичные отложения), а также на участках локальных структурных поднятий и флексур (Щелковский, Ногинский и другие районы). В ходе эксплуатации водоносных горизонтов области безнапорного режима естественного происхождения значительно расширились, и появились новые, связанные только с интенсивным водоотбором из горизонтов. Особенно хорошо это проявляется в подольско-мячковском водоносном горизонте, испытывающем наибольшую техногенную нагрузку, — зоны безнапорной фильтрации фиксируются практически по всей площади эксплуатации горизонта.



Рис. 20. Модельная схема распространения региональной депрессионной воронки в эксплуатируемых водоносных горизонтах и комплексах Московского региона (по данным мониторинга подземных вод АО «Центральное ПГО». М., 2014)

Когда водоотбор осуществляется в области выхода горизонтов на поверхность (под четвертичные отложения) или в пределах локальных структурных поднятий, зоны безнапорного режима естественного происхождения расширяются; в качестве примера можно привести водоносные горизонты верхнекаменноугольных отложений. Для наиболее интенсивно эксплуатируемого подольско-мячковского горизонта можно приблизительно выделить две области различного генезиса безнапорного режима: естественного происхождения (районы, находящиеся за пределами депрессионной воронки, — Озерский, Зарайский, частично Ступинский, Каширский, Коломенский) и техногенного

происхождения (Красногорский, Одинцовский, Наро-Фоминский, Ленинский, Подольский, Домодедовский, Чеховский, Люберецкий, Раменский, Воскресенский районы). Появление и расширение зон безнапорного режима фильтрации может приводить к истощению и загрязнению эксплуатируемых водоносных горизонтов.



Рис. 21. Модельная схема зон безнапорного режима фильтрации в эксплуатируемых водоносных горизонтах и комплексах Московского региона (по данным мониторинга подземных вод АО «Центральное ПГО». М., 2014)

В целом на территории Московского региона гидродинамическая обстановка в эксплуатируемых водоносных горизонтах и комплексах в 2021 г. практически не изменилась относительно предыдущих лет.

**Условия залегания и особенности гидрогеохимического состава подземных вод на территории Московского региона**

Подземные воды каменноугольных водоносных горизонтов являются основным источником хозяйственно-питьевого водоснабжения Московской области, а в особый период возникновения чрезвычайных ситуаций — это единственный резервный источник, поэтому необходимо исключить его дальнейшее истощение и загрязнение.



Каждый горизонт имеет свои условия залегания и водообмена и характеризуется различной эксплуатационной нагрузкой на рассматриваемой территории. Этими факторами обусловлены различия природного химического состава и качества вод<sup>23</sup>.

На большей части территории Московской области нарушен гидрогеодинамический режим, что предопределяет нарушение гидрогеохимического режима и соответственно изменение химического состава подземных вод. Поэтому можно предполагать, что естественные условия формирования химического состава подземных вод основных (продуктивных) водоносных горизонтов на территории Московской области в настоящее время остались только за пределами депрессионных воронок каждого водоносного горизонта (комплекса). К ним относятся некоторые территории административных районов — Талдомского, Шатурского, Егорьевского, Лотошинского, Шаховского, Волоколамского, Луховицкого, Озерского, Можайского, Серпуховского, Каширского, Зарайского, Серебряно-Прудского, за исключением районных центров и крупных населенных пунктов.

Происхождение большей части компонентов и показателей, превышающих ПДК в подземных водах, используемых для питьевых целей, связано с природными условиями, а именно с химическим составом водовмещающих пород. При интенсивной эксплуатации водоносных горизонтов нарушаются естественные гидрогеодинамические условия, что влечет за собой интенсивное выщелачивание минералов водовмещающих пород и неизбежное увеличение концентраций нормируемых компонентов и показателей в извлекаемых подземных водах. Другими словами, ухудшение качества питьевых подземных вод напрямую зависит от увеличения водоотбора.

Территория Московской области представляет собой сложный природно-техногенный объект, на котором осуществляется интенсивная эксплуатация подземных вод одновременно из разных водоносных горизонтов и комплексов, т. е. подземные воды территории испытывают комплексное влияние техногенной нагрузки.

**Верхнекаменноугольные водоносные отложения** включают в себя гжельско-ассельский и касимовский водоносные комплексы

*Гжельско-ассельский водоносный комплекс (C<sub>3g</sub>-P<sub>1a</sub>)* распространен лишь на северо-востоке Московской области, где граница его распространения проходит северо-восточнее Москвы — от северо-востока Клинского до северной окраины Шаховского района: северо-восточнее линии Клин — Лобня — Икша — Мытищи — Балашиха — Электроугли — Ликино-Дулево — Шатура (см. рис. 14). Водовмещающие породы — доломитизированные известняки и доломиты, иногда загипсованные, с прослоями глин и мергелей.

На территории области этот водоносный комплекс является первым от поверхности. Практически повсеместно он перекрывается юрским-келловей-киммериджским терригенным водоупорным горизонтом за исключением

<sup>23</sup> Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 год»; О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области...

эрозионных размывов водоупора, расположенных в речных долинах. Ниже гжельско-ассельский водоносный комплекс подстилается щелковским терригенным водоупорным горизонтом.

Гжельско-ассельский водоносный комплекс является основным источником централизованного водоснабжения в Талдомском, Дмитровском, Сергиево-Посадском, Пушкинском, Щелковском, Ногинском, Павлово-Посадском, северной части Орехово-Зуевского и Шатурского административных районов. Наибольший водоотбор отмечается в Сергиевом Посаде, Щелкове, Орехово-Зуеве, Ногинске, Дмитрове.

По имеющимся данным территориального мониторинга подземных вод воды комплекса пресные. Их общая минерализация в среднем составляет ~ 330–368 мг/л. Состав вод гидрокарбонатный, реже хлоридно-гидрокарбонатный с преобладанием катионов кальция и магния; рН среды — нейтральная: ~ 7,4. Воды жесткие, их общая жесткость составляет ~ 6,14° Ж и для 19,2% определений превышает допустимую норму.

Качество подземных вод комплекса для питьевых целей, определяемое действующими нормативными документами, практически повсеместно не соответствует по природным показателям: железу общему (от 1 до 70 ПДК) и общей жесткости (от 1 до 5,66 ПДК), в местах наибольшего водоотбора увеличиваются концентрации лития (до 5,47 ПДК), марганца (до 7,45 ПДК) и фторидов (до 2,6 ПДК).

Железо — основной компонент, ухудшающий качество подземных вод комплекса. Его содержание в воде достигает 21 мг/л и в среднем составляет 1,14 мг/л (3,8 ПДК). Некондиционное содержание железа наблюдается для 75,8% определений, что требует дополнительной водоподготовки практически на всех водозаборах. Для 5,8% определений в водах комплекса превышает норму содержание марганца, который сопутствует железу и вместе с ним накапливается в подземной воде. Содержание других природных показателей (фторидов, стронция, лития) редко превышает норму и наблюдается лишь по отдельным водозаборам.

Поскольку гжельско-ассельский водоносный комплекс — первый от поверхности, он в большей степени подвержен загрязнению подземных вод азотосодержащими показателями, тяжелыми металлами и др. Загрязнения вод комплекса в основном наблюдаются по водозаборам ближнего Подмосковья (в основном Щелковского района), а также на водозаборах городских округов.

В гжельско-ассельском водоносном комплексе депрессия охватывает практически всю площадь его распространения на территории Московской области и выходит за ее пределы в восточном направлении во Владимирскую область. Наибольшие понижения уровней относительно естественных условий зафиксированы в Сергиево-Посадском районе — 50–60 м, локальные воронки с глубиной более 20 м сформировались в районе городов Ногинска и Орехово-Зуево. Практически отсутствует региональное понижение уровней в Талдомском районе и северной части Дмитровского района.

*Касимовский водоносный комплекс ( $C_3ksm$ )* распространен в северо-восточной и восточной частях территории Московской области. Граница его

распространения проходит от юго-восточной окраины Истринского района по центральной части Москвы до южной окраины Шаховского района: северо-восточнее линии — долина р. Ламы — Истринское водохранилище — Дедовск — Москва — Люберцы — Воскресенск — долина р. Ялмы. Содержит трещинно-пластовые и карстово-пластовые воды в карбонатных отложениях. На юго-западной территории своего распространения комплекс является первым от поверхности продуктивным водоносным комплексом, и его перекрывает келловей-киммериджский водоупорный горизонт. На северо-востоке области он залегает ниже гжельско-ассельского водоносного комплекса и перекрыт щелковским водоупором. Повсеместно его подстилает кривякинский водоупорный горизонт.

Комплекс включает в себя от одного до трех пластов, принадлежащих к измайловской, перхуровской и ратмировской толщам. Водоносные пласты разделены глинисто-мергелистыми слоями неверовской и мешеринской толщ. Водовмещающими породами являются известняки, доломиты и доломитизированные мергели. Мощность касимовского водоносного комплекса определяется количеством его слагающих пластов и достигает 100 м. Абсолютные отметки кровли составляют от 140 м до минус 95 м. Погружение кровли — в северо-восточном направлении. Воды комплекса пресные, их общая минерализация составляет ~ 344–414 мг/л. Тип вод комплекса гидрокарбонатный, редко сульфатно- и хлоридно-гидрокарбонатный с преобладанием катионов кальция и магния; рН среды — нейтральная: ~ 7,42. Воды жесткие, их общая жесткость в среднем составляет ~ 6° Ж, и для 18,3% определений ее значение превышает ПДК, достигая 4,11 ПДК.

Как и для вышезалегающего гжельско-ассельского водоносного комплекса, воды касимовского водоносного комплекса зачастую имеют некондиционное качество по таким компонентам, как железо и марганец. В связи с этим возникает необходимость дополнительной водоподготовки вод на многих водозаборах. Так, железо превышает норму по 64% определений, и в среднем его концентрация в воде составляет 1,04 мг/л (3,5 ПДК), достигая 24,3 мг/л (81 ПДК). Содержание марганца превышает норму для 9,2% определений. Концентрации других природных компонентов в воде редко превышают норму, в местах наибольшего водоотбора увеличиваются концентрации лития (до 8,67 ПДК), марганца (до 10 ПДК) и фторидов (до 2,93 ПДК).

Касимовский водоносный комплекс также подвержен загрязнению подземных вод, особенно на той площади распространения, где он залегает первым от поверхности. Азотосодержащие показатели, связанные с фекальными загрязнениями, чаще других ухудшают качество подземных вод комплекса. Помимо этого, на некоторых водозаборах отмечаются загрязнения вод металлами, хлоридами и др. Это наблюдается в основном в Ногинском, Щелковском районах и городских округах Мытищ, Балашихи, Электрогорска.

Питание касимовского водоносного комплекса осуществляется за счет инфильтрации из вышезалегающих водоносных горизонтов, разгрузка — в основном за счет водоотбора. Воды комплекса в основном напорные, но в результате интенсивного водоотбора, осуществляющегося практически по всей территории распространения водоносного комплекса в Московский

области, напор вод снижается, а местами вовсе исчезает, и воды приобретают безнапорный характер.

В касимовском водоносном комплексе депрессионная воронка занимает практически всю площадь его распространения в Московской области. Максимальная глубина воронки зафиксирована в Солнечногорском, Пушкинском и Сергиево-Посадском районах — 50–60 м. Практически во всех районных центрах и крупных городах в пределах общей региональной депрессии сформировались локальные воронки депрессии с глубиной 10 м и более.

**Среднекаменноугольные водоносные отложения** объединяют в своем составе подольско-мячковский водоносный горизонт и каширский водоносный комплекс.

*Подольско-мячковский водоносный горизонт (C<sub>2</sub>pd-тс)* распространен практически на всей территории Московской области за исключением ее юго-запада (Можайский, частично Наро-Фоминский районы) и юга (Серпуховский, Серебряно-Прудский, Каширский, Зарайский, частично Озерский районы) (см. рис. 14). Причем практически на половине территории Московской области (Лотошинский, Шаховской, Волоколамский, Рузский, Истринский, Одинцовский, Домодедовский, частично Раменский, Воскресенский, Коломенский, Ступинский, Луховицкий и другие районы) он является первым от поверхности водоносным горизонтом, приуроченным к каменноугольным отложениям. Водовмещающими породами служат трещиноватые органогенные известняки с подчиненными прослоями глин, мергелей и доломитов.

Абсолютные отметки кровли подольско-мячковского водоносного горизонта уменьшаются в северо-восточном направлении от 189 до минус 140 м. Нижний водоупор подольско-мячковского водоносного горизонта представлен ростиславльскими глинами и мергелями. Питание горизонта осуществляется за счет инфильтрации из вышележающих водоносных горизонтов — на севере из касимовского водоносного комплекса, на юге — из мезокайнозоя, разгрузка осуществляется за счет интенсивного водоотбора.

Подольско-мячковский водоносный горизонт — основной эксплуатационный горизонт Московской области. Он имеет самую высокую эксплуатационную нагрузку и достаточно пестрый химический состав вод. Воды горизонта пресные, общая минерализация вод составляет ~ 457–474 мг/л. Состав вод в основном гидрокарбонатный с преобладанием катионов кальция и магния. Подземные воды горизонта в основном жесткие, их общая жесткость составляет ~ 7,35° Ж (1,05 ПДК), превышая ПДК для 39,4% определений и достигая 5,17 ПДК.

Перечень показателей, ухудшающих качество подземных вод горизонта, достаточно пестрый, что вызвано как природными условиями формирования химического состава, так и эксплуатационной нагрузкой на водоносный горизонт. Так, помимо уже наблюдающейся в вышележающих водоносных комплексах ассоциации показателей «железо — общая жесткость — марганец» качество вод данного водоносного горизонта нередко усугубляется такими компонентами, как фтор, литий и стронций, накапливающихся в содержаниях выше нормы в условиях более затрудненного водообмена, которые формируются при значительном погружении водоносного горизонта на востоке и северо-востоке области.

Железо в подземной воде горизонта составляет в среднем 1,4 мг/л (4,7 ПДК) и превышает норму для 66 % определений, достигая 120 ПДК. Содержание марганца в среднем равно 0,06 мг/л и превышает ПДК для 15,25 % определений, достигая по отдельным водозаборам 10,2 ПДК. Концентрация фтора, лития и стронция заметно увеличивается и нередко ухудшает качество подземных вод для 21,35 % определений — по фтору (до 7 ПДК), для 2,95 % — по литию (до 11 ПДК), 15,12 % — по стронцию (до 5 ПДК). Загрязнения подземных вод горизонта наиболее часто наблюдаются по водозаборам Люберецкого и Раменского районов, а также городских округов Подольск, Дзержинский, Домодедово, Шаховская.

Горизонт в основном напорный, однако местами в результате сработки уровня напор над кровлей не только исчез, но и уровень стал ниже кровли водоносного горизонта. В подольско-мячковском водоносном горизонте депрессия охватывает большую часть его распространения в Московской области. Наибольшие понижения уровней (до 50–80 м) зафиксированы в Химкинском, Солнечногорском, Мытищинском, Пушкинском, Щелковском и Балашихинском районах. Почти во всех районных центрах и крупных городах, где эксплуатируется подольско-мячковский горизонт, в пределах общей депрессии также сформировались локальные воронки с глубиной относительно фона 10 м и более.

*Каширский водоносный комплекс (C<sub>2</sub>ks)* распространен практически на всей территории Московской области, где его повсеместно перекрывает ростиславльский водоупорный горизонт. Водоносный комплекс лишь на юго-восточной окраине Московской области является первым от поверхности. На остальной территории комплекс залегает ниже подольско-мячковского водоносного горизонта и других верхнекаменноугольных водоносных комплексов. Подстилает каширский водоносный комплекс региональный верейский водоупор, изолирующий его от алексинско-протвинского водоносного комплекса.

Водовмещающими породами являются трещиноватые известняки и доломиты. Мощность каширского водоносного комплекса на территории области достигает 109 м. Абсолютные отметки кровли — от 190 до минус 160 м.

По гидрогеохимическому составу природные воды комплекса, а также их характеристики качества схожи с водами подольско-мячковского водоносного горизонта, отличие — меньшая жесткость и увеличение содержания сульфатов. Воды комплекса пресные, общая минерализация составляет ~ 370–466 мг/л; рН среды — нейтральная: ~ 7,4. Состав вод гидрокарбонатный и сульфатно-гидрокарбонатный с преобладанием катионов кальция и магния, редко — хлоридно-гидрокарбонатный с преобладанием катионов кальция и магния. Повышенное содержание сульфатов связано с условиями затрудненного водообмена и характеризует природный состав вод комплекса. Воды жесткие, общая жесткость вод составляет ~ 6,81° Ж и для 26 % определений превышает допустимую норму, достигая 3,2 ПДК.

В водах каширского водного комплекса ассоциация природных показателей «железо — общая жесткость — марганец» также ухудшает качество подземных вод, но не имеет доминирующего значения, как в водах горизонтов, залегающих выше. Железо превышает норму только в 30,5 % определений, средняя

концентрация его в воде понижается, составляя ~ 0,51 мг/л (1,7 ПДК), местами достигает 21 ПДК. Однако в данных условиях водообмена в подземных водах накапливается другая ассоциация природных компонентов — «фториды-литий-стронций-бор», и качество вод становится некондиционным по этим показателям. Так, наиболее часто (для 37,8% определений) встречается превышение нормы по литию (от 1 до 5 ПДК), средняя концентрация которого в подземных водах комплекса составляет 0,034 мг/л (1,13 ПДК). Также для 23,5% определений в водах отмечено превышение ПДК по фторидам (от 1 до 6,7 ПДК), содержание которых в среднем составляет 1,13 мг/л и достигает 14 мг/л. Заметно увеличивается в воде содержание стронция и бора, превышения по которым наблюдались для 23,5% (от 1 до 5 ПДК) и 10,4% (от 1 до 2,8 ПДК) определений соответственно.

Водоносный комплекс в основном глубоко залегает на всей площади распространения в Московской области и потому мало подвержен загрязнению подземных вод. Однако в местах выклинивания вышезалегающего подольско-мячковского водоносного горизонта и выхода каширского комплекса на поверхность под четвертичные отложения наблюдаются загрязнения по азотосодержащим показателям, и зафиксированы они в Шаховском, Наро-Фоминском и Зарайском районах.

В пределах области собственно каширский водоносный комплекс эксплуатируется относительно мало, в основном совместно с подольско-мячковским водоносным горизонтом.

В каширском водоносном комплексе депрессионная воронка занимает большую часть его распространения в Московской области и не отмечается лишь в местах выхода его на поверхность. Отдельные депрессионные воронки сформировались в Коломенском, Луховицком и Озерском районах. Максимальная глубина воронки (70–90 м) зафиксирована в Химкинском, Солнечногорском, Мытищинском, Пушкинском, Щелковском и Балашихинском районах.

**Нижнекаменноугольные водоносные отложения** представлены в основном алексинско-протвинским водоносным комплексом.

*Алексинско-протвинский водоносный комплекс (C<sub>1al-pr</sub>)* распространен на всей территории Московской области. Этот водоносный комплекс залегает ниже других (рассмотренных в этом разделе) водоносных комплексов. Лишь на отдельных участках на юге и юго-востоке Московской области он является первым от поверхности.

Водовмещающие породы — известняки и доломиты — разделены прослоями глины протвинской, серпуховской и окской серий. Общая мощность пород — 5–109 м. Верхним водоупором служат глины и мергели верейского горизонта (14–21 м), нижним — черные и темно-серые углистые глины тульского горизонта (18–25 м). Абсолютные отметки кровли — от 200 м на юге до 240 м на северо-востоке. Практически на всей территории области воды комплекса напорные, но местами уровень снижается ниже кровли.

Питание вод комплекса осуществляется за счет инфильтрации из вышезалегающих водоносных горизонтов, разгрузка — за счет водоотбора и латеральным потоком в сторону погружения водовмещающих пород.

Алексинско-протвинский водоносный комплекс интенсивно эксплуатируется водозаборными скважинами, воды используются для хозяйственно-бытовых и технических целей. Наивысшее положение пьезометрической поверхности отмечается на участках, удаленных от крупных водозаборов.

Воды комплекса пресные, общая минерализация составляет ~ 445–484 мг/л; рН среды — нейтральная: ~ 7,45. Воды комплекса в основном имеют сульфатно-гидрокарбонатный, реже гидрокарбонатный состав с преобладанием катионов кальция и магния.

Алексинско-протвинский водоносный комплекс залегает под региональным водоупорным горизонтом, а потому для него характерны наиболее затрудненные условия водообмена. Следствием этого является увеличение содержания сульфатов в подземной воде. Воды комплекса жесткие, их общая жесткость в среднем составляет ~ 6,51°Ж, и для 25,1% определений значение общей жесткости превышает норму, достигая 4 ПДК.

В воде увеличиваются концентрации фторидов (от 1 до 7,5 ПДК), стронция (от 1 до 4,5 ПДК), лития (от 1 до 6 ПДК) и бора (от 1 до 5 ПДК), средние содержания которых превышают предельно допустимые и составляют для фторидов ~ 2,12 мг/л (1,4 ПДК), стронция — 9,15 мг/л (1,3 ПДК), лития — 0,038 мг/л (1,3 ПДК), бора — 0,37 мг/л соответственно. При этом превышение нормативов содержания этих компонентов отмечается в большинстве определений. Так, фториды превышают норму для 59,2% определений, стронций — для 55,5%, литий — для 45,9%, бор — для 33,3%. Как и в других водоносных горизонтах и комплексах, зачастую подземные воды имеют некондиционное качество по железу, превышение по которому отмечается для 40,8% определений, а среднее содержание составляет ~ 0,64 мг/л (2,1 ПДК), достигая 10,72 мг/л (35 ПДК).

Загрязнения в водах комплекса в основном отмечаются по водозаборам ближнего Подмосковья: Люберецкого, Одинцовского районов и Реутова, а также в Серпуховском районе, где водоносный комплекс является первым от поверхности.

В алексинско-протвинском водоносном комплексе депрессионная воронка охватывает практически всю территорию Московской области, за исключением крайних западных и юго-восточных районов, где наблюдается его выход на поверхность. На юго-западе области депрессия сочленяется с воронкой, образовавшейся на территории Обнинского промышленного района Калужской области. Наибольшие понижения уровней отмечаются в Наро-Фоминском, Одинцовском, Красногорском, Химкинском, Солнечногорском, Мытищинском, Балашихинском, Люберецком, Ленинском и Подольском районах и составляют 70–90 м.

***Особенности гидрогеохимического состава подземных вод  
Московского региона, предопределяющие способы водоподготовки  
для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения***

Каждый эксплуатируемый водоносный горизонт и комплекс при общих гидрогеохимических характеристиках, обусловленных карбонатным составом водовмещающих пород, имеет свои особенности<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области...

Водоносные горизонты и комплексы *верхнекаменноугольных* отложений Московского региона характеризуются превышением железа практически повсеместно — более 70 % определений, стронций и литий превышают норматив в 2–3 % определений, фтор — в ~5 %.

В водоносных горизонтах и комплексах *среднекаменноугольных* отложений превышение по железу встречается несколько реже — в 50 % определений, увеличивается превышение по литию, стронцию и фтору до 15–20 % определений.

В водоносных горизонтах и комплексах *нижнекаменноугольных* отложений уменьшается количество превышений по концентрации железа до средних 40 % определений, но значительно увеличивается количество превышений по концентрации фтора, стронция и лития — до 55–65 % определений.

Кроме того, в отдельных городах подземные воды разных водоносных горизонтов содержат в концентрациях, превышающих ПДК, такие нормируемые компоненты, как марганец и магний, хром и кадмий. Их присутствие в воде первых от поверхности эксплуатируемых горизонтов карбона имеет явно техногенное происхождение. Повышенное содержание аммония и рост окисляемости (как индикаторы антропогенной нагрузки на подземные воды) обуславливаются коммунально-бытовым загрязнением. Эти данные подтверждаются результатами как собственного опробования в рамках ведения ГМСН, так и полученными от недропользователей. Основные причины ухудшения качества подземных вод — ухудшение общей гидрогеологической обстановки, произошедшей за последние 20–30 лет в регионе, а также локальное техногенное загрязнение на самих участках размещения водозаборов.

В силу природных гидрогеологических особенностей территории Московского региона, а также высокой антропогенной нагрузки качество подземных вод питьевого назначения на 70–80 % не соответствует современным нормативным требованиям. Использование этой воды возможно после доведения отдельных показателей до нормативных значений путем дорогостоящей водоподготовки или смешения с более чистой водой.

Виды необходимой водоподготовки для районов Московской области и городов ближайшего Подмосковья определяются исходя из характеристик качества подземных вод основных эксплуатационных водоносных горизонтов (комплексов). При этом учитывается теоретическая возможность смешения воды разных горизонтов в пределах каждого района, основанная на величине водоотбора по каждому эксплуатируемому водоносному горизонту и комплексу.

Выбор методов очистки воды, расчетных параметров сооружений, а также вида и доз реагентов следует осуществлять на основании технологических изысканий, проводимых непосредственно у источников водоснабжения, в соответствии с СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» СНиП 2.04.02-84\* «Свод правил от 27.12.2021 № 31.13330.2021».

Решения о способах водоподготовки и возможности смешения подземных вод разных водоносных горизонтов могут приниматься только индивидуально на каждом водозаборе в соответствии с конкретными характеристиками качества подземных вод эксплуатируемых водоносных горизонтов.



**Обзор технологий водоподготовки подземных вод  
для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения  
на территории Московского региона**

Выбор технологии водоподготовки определяется видом загрязнений (примесей) воды, а также ее физико-химическими свойствами (температура, щелочность, минерализация и пр.)<sup>25</sup>. В представляемой классификации примесей подземных вод (табл. 4) к лимитирующим отнесены компоненты, среднее содержание которых в питьевой воде превышает ПДК.

Таблица 4. Классификация примесей подземных вод  
и соответствующих технологических решений

№ п/п	Лимитирующие примеси	Технология водоподготовки	Тип водоподготовки	Категория водоподготовки
	<i>Компоненты стандартного набора</i>			
1	Железо, марганец	Обезжелезивание (+деманганация)	1	1
	Фтор	Дефторирование	2	2
	Жесткость, стронций, минерализация	Умягчение (опреснение)	2	2
	Совместное присутствие компонентов (Fe, Mn, F, жесткость, Sr, M)	Умягчение с реагентной предпочисткой	2	2
	<i>Специфические компоненты при индивидуальном присутствии</i>			
2	Кремний	Обескремнивание	3.1	3
	Микроэлементы (B, Cd, Li, Ni, As, Se, Pb)	Очистка от микроэлементов	2	2
	Нефтепродукты	Очистка от нефтепродуктов	3.2	3
	Перманганатная окисляемость	Очистка от органических примесей	3.2	3
	α-радиоактивность	Очистка воды от радиоактивных компонентов	3.2	3
3	<i>Специфические компоненты на фоне стандартных компонентов</i>	Сопутствующая очистка в технологических процессах типа 1, 2	1, 2	1, 2
4	Любые при незначительном превышении ПДК (1–3 ПДК)	Разбавление чистой водой	4.1	4
5	Любые при значительном превышении ПДК по отдельным компонентам (свыше 3 ПДК)	Предочистка или доочистка с разбавлением чистой водой	4.2	4

<sup>25</sup> О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области...

Железо и марганец объединены в одну группу, так как действующие нормативные документы рекомендуют проводить деманганацию воды совместно с ее обезжелезиванием. Стронций не является классической примесью воды, однако он отнесен к компонентам жесткости вследствие близости его химических характеристик свойствам кальция. Умягчение и опреснение воды объединены в одну группу, так как сегодня для их реализации применяется одна и та же технология (мембранное разделение — обратный осмос).

Приведем описание основных методов водоподготовки, применяемых и возможных для применения на территории Московской области, и их принципиальные технологические схемы (для краткости изложения использована цифровая маркировка типов и категорий водоподготовки)<sup>26</sup>.

#### *Обезжелезивание воды (1)*

Выбор метода обезжелезивания воды определяется такими характеристиками ее качества, как щелочность, жесткость, температура.

Для Московской области характерны достаточно высокие значения этих величин: жесткость  $\geq 2$  мг-экв/дм<sup>3</sup>, щелочность  $\geq 2$  мг-экв/дм<sup>3</sup>, температура  $\geq 6^\circ\text{C}$ . В таких условиях для окисления двухвалентного железа может быть использован кислород воздуха, а для отделения продуктов реакции — фильтрование через песок (рис. 22).

Согласно схеме, в напорный коллектор исходной воды в узле ввода 1 компрессором 6 подается воздух. Вода с воздухом поступает на автоматическую напорную фильтровальную установку 2, где в объеме загрузки происходит окисление железа (+2) и отделение нерастворимых продуктов реакции (взвеси). В поток фильтрата в узле ввода 3 посредством насоса-дозатора 13 из бака 14 дозируется товарный раствор гипохлорита натрия, за счет чего обеспечивается обеззараживание питьевой воды. Далее по схеме вода поступает в резервуар чистой воды 4, а из него отбирается насосной станцией II подъема 5 и подается потребителям.

Грязные промывные воды обрабатываются флокулянтom, его раствор вводится в узле ввода 7 посредством насоса-дозатора 10, отбирающего реагент из растворно-расходного бака 11. Вода с флокулянтom отстаивается в тонкослойных отстойниках 8. После осветления насосная станция 9 возвращает промывную воду в голову станции обезжелезивания. Технологические решения по обороту промывной воды позволяют избежать потерь воды на собственные нужды в количестве до 10% суточного расхода станции.

Шлам из отстойника периодически откачивается насосной установкой 12 и вывозится на станции приема концентрированных сточных вод или полигоны промышленных отходов.

<sup>26</sup> Журба М. Г., Ж. М. Говорова Методология анализа эффективности действующих водоочистных комплексов // ВСТ. — 2009. — № 8. — С. 29–37; Журба М. Г. и др. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : в 3 т. — Т. 1. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2003; Николадзе Г. И. Улучшение качества подземных вод. — М., 1987; О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области...

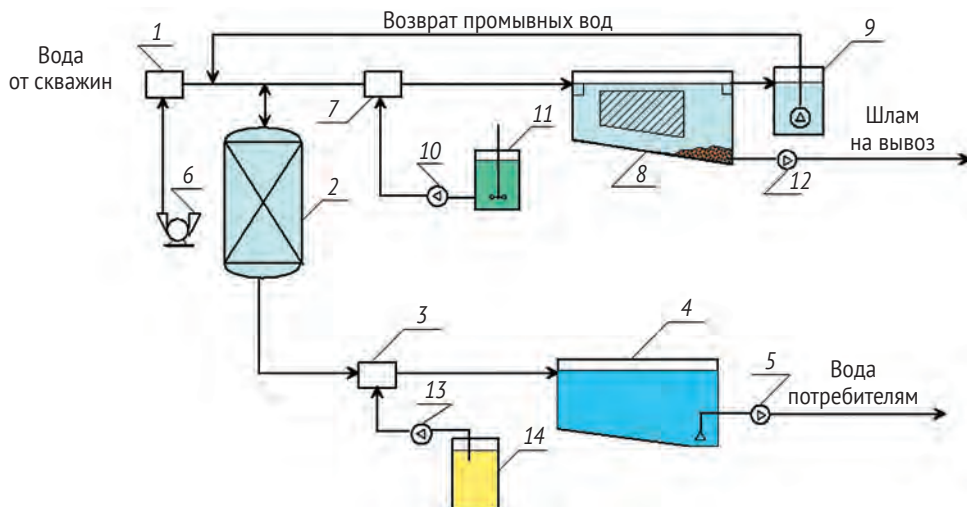


Рис. 22. Технологическая схема станции обезжелезивания подземных вод (1):

1 – узел ввода воздуха; 2 – напорная фильтровальная установка; 3 – узел ввода раствора гипохлорита; 4 – резервуар чистой воды; 5 – насосная станция II подъема; 6 – компрессор безмасляный; 7 – узел ввода флокулянта; 8 – отстойник промывных вод; 9 – насосная станция возврата промывных вод; 10 – насос-дозатор флокулянта; 11 – растворно-расходный бак флокулянта; 12 – насосная установка осадка; 13 – насос-дозатор гипохлорита; 14 – расходный бак гипохлорита

Следует отметить, что при удалении из воды  $1 \text{ г/м}^3$  железа образуется около  $0,2 \text{ кг/м}^3$  обводненного шлама — осадка гидроксида железа (+3) с влажностью более 99%, который не может быть сброшен в трубопроводную сеть городской бытовой канализации. Поэтому для утилизации шлама необходим его вывоз на станцию приема концентрированных стоков или полигон промышленных отходов.

*Дефторирование (обесфторивание), умягчение (опреснение)  
и комплексная очистка подземной воды от микрокомпонентов (2)*

Согласно СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» СНиП 2.04.02-84\* «Свод правил от 27.12.2021 № 31.13330.2021», для обесфторивания воды с содержанием фтора до  $5 \text{ мг/дм}^3$  рекомендуется метод контактно-сорбционной коагуляции. Однако этот метод требует применения реагента — сульфата алюминия, с расходом около  $80 \text{ г/г}$  удаляемого фтора. Такая доза реагента приводит к образованию обводненного шлама гидроксида алюминия в количестве около  $4,2 \text{ кг/г}$  фтора. Утилизация этого шлама затруднена, при хранении осадок выделяет растворимые фториды. Поэтому сегодня все чаще применяется гиперфильтрационное обесфторивание воды в процессе комплексной очистки от микрокомпонентов (рис. 23).

При использовании гиперфильтрационной технологии (обратный осмос) качество исходной воды, которая подается на мембрану, нормируется по таким показателям, как взвешенные вещества, железо, марганец, окисляемость, нефтепродукты. В связи с этим полная технологическая схема включает в себя

сооружения предварительной очистки воды. Обычно в качестве реагента предочистки используются коагулянты или окислитель (перманганат калия) с последующим отделением нерастворимых продуктов реакции путем фильтрования через песок.

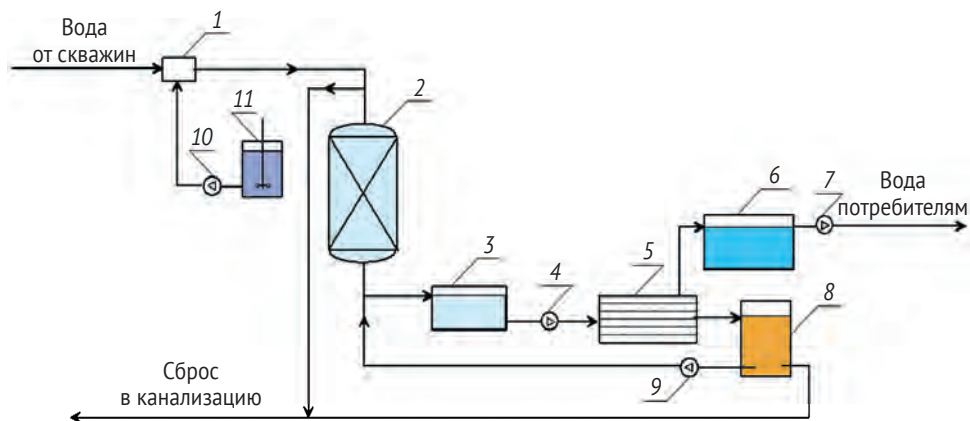


Рис. 23. Технологическая схема комплексной очистки подземных вод гиперфильтрацией (обратный осмос (2)):

1 – узел ввода реагента; 2 – песчаные фильтры предочистки; 3 – резервуар осветленной воды; 4 – насос высокого давления; 5 – модуль гиперфильтрации; 6 – резервуар чистой воды; 7 – насосная станция II подъема; 8 – резервуар концентрата; 9 – промывной насос; 10 – насос-дозатор реагента предочистки; 11 – растворительно-расходный бак реагента предочистки

Согласно схеме, в поток исходной воды в узле ввода 1 дозируется раствор реагента предочистки. Приготовление последнего производится в растворительно-расходных баках 11, а дозирование обеспечивается насосом-дозатором 10. Отделение взвеси производится на автоматических напорных фильтрах 2. Фильтрат собирается в промежуточном резервуаре 3, откуда отбирается насосом высокого давления 4 и подается на мембранный модуль 5. Здесь поток воды делится на две части: чистая (обесфторенная) вода и концентрат, содержащий фториды и другие микрокомпоненты состава исходной воды в высоких концентрациях. Очищенная вода самотеком поступает в резервуар чистой воды 6, откуда отбирается насосной станцией II подъема 7 и подается потребителям. Концентрат собирается в резервуаре концентрата 8, откуда сбрасывается в канализацию. Часть расхода концентрата используется для промывки фильтров предочистки (насос 9). Грязные промывные воды также сбрасываются в канализацию. Объем промывных вод обычно составляет 5–7%, а объем концентрата — 15–25% суточного расхода воды.

Таким образом, подлежит сбросу значительное количество загрязненной воды, что приводит к необходимости больших платежей за прием загрязнений в городскую канализацию. Иногда техническая возможность легального приема таких сточных вод вообще отсутствует.

Следует отметить, что приведенная технологическая схема (2) помимо фтора, жесткости и микрокомпонентов обеспечивает комплексную очистку

подземных вод по показателям — железо, марганец, окисляемость, нефтепродукты, стронций, кремний, минерализация, а также по общей  $\alpha$ -радиоактивности. Получаемая вода стерильна по бактериологическим показателям и не требует обеззараживания. При ее транспортировке на большие расстояния необходимо хлорирование малыми дозами.

### Обескремнивание воды (3.1)

Для неглубокого обескремнивания воды из всего разнообразия существующих методов для условий Московской области предпочтительно использовать сорбцию гидроксидами железа (рис. 24).

В узле ввода 1 в поток подземной воды посредством насоса-дозатора 9 из растворено-расходного бака 8 дозируется щелочной реагент (каустическая или кальцинированная сода). Затем в узле ввода 2 дозируется железный коагулянт. Приготовление его рабочего раствора производится в растворено-расходном баке 10, а дозирование обеспечивается насосом-дозатором 11. Отделение большей части взвеси происходит в осветлителе 3, доочистка обеспечивается фильтрованием через песчаный фильтр 4. В узле ввода 5 производится дозирование товарного раствора гипохлорита натрия (насос-дозатор 12, расходный бак 13). Далее фильтрат поступает в резервуар чистой воды 6, откуда отбирается насосом II подъема и подается потребителям.

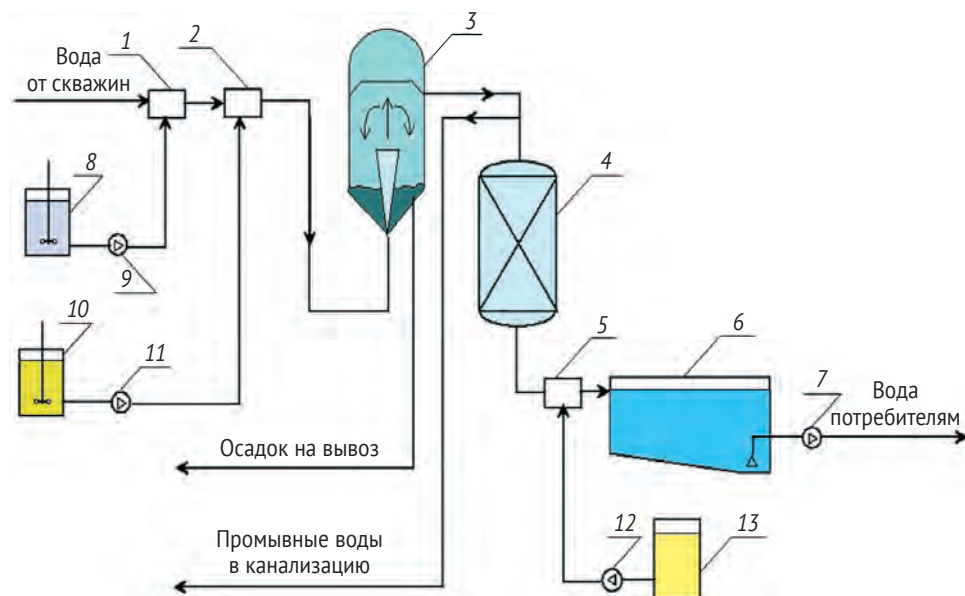


Рис. 24. Технологическая схема обескремнивания воды (3.1):

1 — узел ввода щелочного реагента; 2 — узел ввода коагулянта; 3 — напорный осветлитель; 4 — автоматический напорный фильтр; 5 — узел ввода гипохлорита; 6 — резервуар чистой воды; 7 — насосная станция II подъема; 8 — растворено-расходный бак щелочного реагента; 9 — насос-дозатор щелочного реагента; 10 — растворено-расходный бак коагулянта; 11 — насос-дозатор коагулянта; 12 — насос-дозатор гипохлорита; 13 — расходный бак гипохлорита

Следует отметить, что при использовании такой технологии для снижения содержания соединений кремния на  $1 \text{ мг/дм}^3$  требуется около  $30 \text{ г/м}^3$  сульфата железа (+3), что приводит к образованию около  $0,78 \text{ кг/м}^3$  обводненного шлама гидроксида железа (+3). Потери воды с осадком и в виде промывных вод достигают 15% суточного расхода сооружений.

#### *Очистка подземных вод от микроэлементов (2)*

Очистка воды от микроэлементов (бор, кадмий, литий, никель, мышьяк, селен, свинец и др.) в связи с низкими значениями их ПДК вызывает определенные трудности. Требуемые селективность и эффективность обеспечиваются применением селективных синтетических ионообменных материалов. Однако в этом случае требуется обеспечить глубокую очистку исходной воды от тяжелых металлов фона (железо, марганец) и полярных органических соединений. Необходимость такой предварительной очистки делает всю технологию дорогой, особенно с учетом обезвреживания всех образующихся отходов. Поэтому в последние годы для очистки воды от микроэлементов все чаще применяют комплексную очистку (2) — мембранные методы (см. рис. 23). Путем подбора типа мембраны, количества ступеней и режима работы обычно удается обеспечить необходимую селективность разделения по всем компонентам.

#### *Очистка подземных вод от нефтепродуктов, других органических и радиоактивных компонентов (3.2)*

Очистка воды от нефтепродуктов и/или других органических примесей, содержание которых косвенно передается показателем «перманганатная окисляемость», обычно обеспечивается путем применения коагулянтов или мягких окислителей (перманганат калия). Эффективность последнего объясняется наличием хороших сорбционных свойств у продукта реакции — гидрата диоксида марганца  $\text{MnO}(\text{OH})_2$ . Из коагулянтов предпочтение обычно отдается солям алюминия.

Универсальная схема реагентной обработки приведена на рисунке 25. Низкие значения доз реагентов позволяют обеспечить необходимое качество воды при использовании одноступенчатого осветления фильтрованием. По этой же причине количество и загрязненность промывных вод невелики, что обычно позволяет сбросить их в существующие системы канализации. Согласно схеме, в узлах ввода 1 и 2 в поток подземных вод вводятся щелочной реагент и коагулянт (или перманганат калия). Приготовление необходимых растворов производится в баках 7 и 9, а их дозирование обеспечивается насосами-дозаторами 8 и 10. Отделение нерастворимых продуктов реакции происходит в теле загрузки осветлительных фильтров 3. В узле ввода 4 вода обеззараживается товарным раствором гипохлорита натрия. Последний подается насосом-дозатором 11 из расходного бака 12. Под остаточным напором вода поступает в резервуар чистой воды 5, откуда отбирается насосами II подъема и подается потребителям. Объем сбрасываемой в канализацию воды обычно не превышает 5–7% суточного расхода.

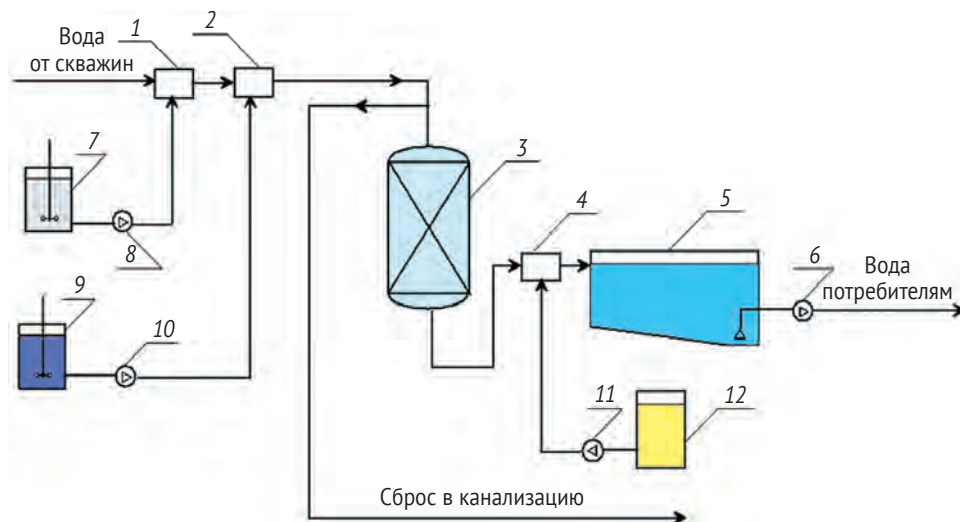


Рис. 25. Технологическая схема реагентной обработки подземных вод (3):

1 – узел ввода щелочного реагента; 2 – узел ввода коагулянта (перманганата калия); 3 – напорный песчаный фильтр; 4 – узел ввода гипохлорита; 5 – резервуар чистой воды; 6 – насосная станция II подъема; 7 – растворо-расходный бак щелочного реагента; 8 – насос-дозатор щелочного реагента; 9 – растворо-расходный бак коагулянта (перманганата калия); 10 – насос-дозатор коагулянта (перманганата калия); 11 – насос-дозатор гипохлорита; 12 – расходный бак гипохлорита

Технология реагентной обработки позволяет обеспечить также снижение радиоактивности воды на 50–70%, что обычно достаточно для условий Московской области. Повышение эффективности достигается применением больших доз реагентов, индивидуальным подбором коагулянтов и условий образования гидроксидов (рН).

### Очистка подземных вод сложного состава

В Московской области часто встречаются подземные воды сложного состава, когда специфические компоненты (см. табл. 4, группа 2) присутствуют на фоне традиционных примесей (см. табл. 4, группа 1) в различных сочетаниях. Строго говоря, в таких случаях технологические решения могут быть приняты только на основании испытаний (технологических исследований)<sup>27</sup>. Однако в большинстве случаев можно рассчитывать на достижение необходимого качества очищенной воды за счет явлений сопутствующей очистки в технологических процессах группы 1 или 2. Необходимая эффективность достигается подбором реагентов и их рабочих доз. Соответствующие технологические схемы приведены ранее (см. рис. 22, 23, 25).

<sup>27</sup> Журба М. Г., Ж. М. Говорова Методология анализа эффективности действующих водоочистных комплексов; Журба М. Г. и др. Водоснабжение...

### *Использование разбавления чистой водой*

Технический прием разбавления чистой водой (при ее доступности) является эффективным способом достижения нормативного качества подземных вод, используемых для питьевого водоснабжения, при их умеренной загрязненности.

Обычно рассматриваются два случая использования разбавления:

- незначительное превышение ПДК (1–3 ПДК) по любым компонентам; необходимые значения содержания примесей достигаются путем смешения с более чистой водой другого горизонта или ближайшей существующей системы водоснабжения;
- значительное превышение ПДК (свыше 3 ПДК) по отдельным компонентам (при наличии незначительных превышений по другим примесям); необходимое качество воды достигается путем применения технологии предварительной очистки по компонентам с большими превышениями ПДК и последующего разбавления чистой водой.

Для предварительной очистки воды могут быть использованы технологические решения (см. табл. 4) типа 1 (см. рис. 22) или 3 (см. рис. 25).

### ***Выбор оптимальных способов водоподготовки подземных вод на территории Московского региона***

Качество подземных вод на территории Москвы и Московской области отличается исключительным разнообразием, и для различных районов на фоне традиционных (железо, фтор, жесткость) характерно присутствие специфических компонентов как природного (кремний, стронций, бор, литий, селен и пр.), так и техногенного (нефтепродукты, никель, свинец и пр.) происхождения<sup>28</sup>. Обеспечить нормативное качество питьевой воды позволит использование двух технологических схем — это обезжелезивание (1) и комплексная водоочистка (2) (см. рис. 22 и 23).

Технология обескремнивания воды (3.1) сопряжена с образованием значительного количества трудноутилизуемых отходов<sup>29</sup>. Поэтому сегодня ее применение принято считать нерациональным, особенно на объектах малой и средней производительности. Качество воды по содержанию кремния будет обеспечено при использовании технологии 2, которая достаточно универсальна и может применяться для комплексной очистки подземных вод при различных сочетаниях компонентов, превышающих нормативное содержание более чем в 25 % определений.

Снижение повышенной  $\alpha$ -радиоактивности (1–5 ПДК) достигается не только применением технологии реагентной обработки (3), но также путем обезжелезивания (1) и комплексной очистки (2). Использование мембранных методов (обратного осмоса) позволяет снизить значения общей  $\alpha$ -радиоактивности

<sup>28</sup> О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области...

<sup>29</sup> Журба М. Г., Ж. М. Говорова Методология анализа эффективности действующих водоочистных комплексов.



примерно на 70%. Поэтому в районах Московской области, где в подземных водах имеют место повышенные значения общей  $\alpha$ -радиоактивности в сочетании с высокими концентрациями (а) — Fe и (б) — Li, Sr, F, B, наиболее целесообразно применение технологий обезжелезивания (1) и комплексной очистки (2) соответственно.

Как следует из описания технологических решений по водоподготовке, все они сопровождаются образованием трудноутилизируемых отходов (обводненных шламов или концентрированных растворов). Их переработка с последующим вывозом является затратной и, как правило, нецелесообразна на объектах малой и средней производительности. Кроме того, сброс таких отходов в маломощные системы канализации может вызвать затруднения уже на стадии согласования таких решений.

Таким образом, учитывая специфику химического состава вод разных эксплуатируемых водоносных горизонтов на территории районов Московской области, для доведения качества до соответствующего нормативным требованиям в отсутствие смешения возможно применение всего двух технологий очистки, а именно обезжелезивания (1) и комплексной очистки (2). В связи с этим всегда следует рассматривать возможность применения технологий типа 4.1 и 4.2 (см. табл. 4): разбавление чистой водой другого горизонта или ближайшей существующей системы водоснабжения — в данном случае системы МГУП «Мосводоканал».

### *Охрана подземных вод*

В последние десятилетия подземные воды начинают играть все более возрастающую роль и в тех районах, где ранее водоснабжение основывалось на использовании поверхностных вод. Связано это с двумя основными обстоятельствами. Первое — загрязнение поверхностных вод сточными водами, количество которых непрерывно увеличивается с ростом промышленности и благоустройством населенных пунктов. Многие реки в развитых в промышленном отношении странах загрязнены настолько, что в некоторых случаях уже не могут служить источником водоснабжения. Вторым обстоятельством, определяющим преимущественный по сравнению с поверхностными водозаборами рост значения подземных источников водоснабжения, является значительно лучшая их защищенность от любого вида загрязнений.

Совершенно очевидно, что столь важная роль подземных вод в жизни человечества определяет необходимость их надежной охраны, в первую очередь охраны от загрязнения. Почти до конца XIX столетия этой проблеме не уделялось должного внимания. Значительные количества подземных вод получались часто из самоизливающихся скважин, в районе которых хорошая естественная защищенность подземных вод определяла весьма редкое их загрязнение. Слабое развитие микробиологии и бактериологии еще не позволяло анализировать качество подземных вод и связывать эпидемии желудочно-кишечных заболеваний с бактериальным загрязнением этих вод. Сточные воды слаборазвитой

в это время промышленности не создали еще серьезной угрозы химического загрязнения подземных вод.

Лишь в самом конце XIX в. и в начале XX столетия в связи с возросшим использованием подземных вод для целей водоснабжения впервые были поставлены вопросы охраны их качества. Однако вплоть до революции 1917 г. для охраны подземных вод от загрязнения практически почти ничего не предпринималось. Весьма незначительными были мероприятия по борьбе с загрязнением подземных вод и в первые годы советского периода, примерно до 1924–1927 гг. они сводились в основном к выработке мероприятий по определению конструкции отдельных водозаборных скважин и по санитарному режиму на ограниченной территории, прилегающей к этой скважине. Основой для этих рекомендаций служил анализ гидрогеологических условий района работы скважины.

Начавшаяся индустриализация страны, строительство крупных промышленных предприятий определили новый подход к охране подземных вод от загрязнения. Появление крупных водозаборов подземных вод для обеспечения этих предприятий и населенных пунктов водой хозяйственно-питьевого назначения, связанное с этим вовлечение значительных территорий в зону влияния водозаборов настоятельно требовали установления определенного санитарного режима уже на больших территориях. До 1930–1940 гг. задачи охраны подземных вод сводились к предупреждению бактериального загрязнения.

Бурное развитие промышленности, в первую очередь химической, в послевоенные годы (особенно с начала 1950-х гг.), увеличение количества поступающих на дневную поверхность и в водоемы сточных вод, загрязненных стойкими химическими соединениями, привело к появлению многочисленных случаев серьезного химического загрязнения подземных вод. Число случаев загрязнения подземных вод росло с угрожающей быстротой как в нашей стране, так и за рубежом — в Европе и Америке. Возникла настоятельная необходимость в проведении мероприятий по предупреждению загрязнения и по ликвидации уже обнаруженных в подземных водах очагов загрязнения — участков распространения загрязненных вод<sup>30</sup>.

В настоящее время охрана подземных вод на территории Российской Федерации регламентируется государственными нормативными правовыми и методическими документами<sup>31</sup>.

<sup>30</sup> Минкин Е. Л. 1) Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. — М. : Недра, 1967; 2) Исследования и прогнозные расчеты для охраны подземных вод. — М. : Недра, 1972.

<sup>31</sup> Закон РФ «Водный кодекс Российской Федерации»; Закон РФ «О недрах»; Закон РФ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»; Об утверждении Порядка ведения собственниками водных объектов и водопользователями учета объема забора (изъятия) водных ресурсов из водных объектов и объема сброса сточных вод и (или) дренажных вод, их качества : Приказ Минприроды России от 08.07.2009 г. № 205; Об утверждении требований к структуре и оформлению проектной документации на разработку месторождений подземных вод : Приказ Минприроды России от 27.10.2010 г. № 463; Положение об осуществлении государственного санитарно-эпидемиологического

По результатам буровых и опытно-фильтрационных работ разрабатывается **Проект зоны санитарной охраны (ЗСО)** в составе трех поясов в соответствии с требованиями СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения» (зарегистрирован в Минюсте РФ 24.04.2002 г. № 3399).

По проекту ЗСО «Недропользователь» получает Экспертное заключение ФБУЗ «Гигиены и эпидемиологии...», а также Санитарно-эпидемиологическое заключение Территориального отдела Управления федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Московской области (ТОУ «Роспотребнадзор»).

«Недропользователь» обязан разработать рабочую программу контроля качества в соответствии с Федеральным законом «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения», п. 4 СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования...» и п. 3 МУ 2.1.4.682-97 «Методические указания по внедрению и применению санитарных правил и норм...». Разработанная **рабочая программа контроля качества** согласовывается с органами Роспотребнадзора и утверждается сроком на пять лет. По результатам лабораторных исследований воды и утвержденной программы контроля качества «Недропользователь» получает Санитарно-эпидемиологическое заключение ТОУ «Роспотребнадзор» «О соответствии водного объекта санитарным правилам и условиям безопасного для здоровья населения использования водного объекта».

Для предотвращения загрязнения подземных вод с поверхности необходимо строгое соблюдение режима хозяйственной деятельности в пределах зон санитарной охраны недропользователями и действующего законодательства в области охраны подземных вод от загрязнения. Для оперативной оценки состояния недр по режиму, качеству и загрязнению подземных вод необходимо ведение постоянного локального (объектного) мониторинга подземных вод недропользователями и представление данных в систему ГМСН.

### *Роль подземных вод в хозяйственно-питьевом и техническом водоснабжении*

Из всех видов полезных ископаемых пресные подземные воды являются наиболее ценными и играют существенную роль в развитии многих отраслей

---

надзора в Российской Федерации, утвержденное Постановлением Правительства РФ от 15 сентября 2005 г. № 569; СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий»; СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения» (зарегистрирован в Минюсте РФ 24.04.2002 г. № 3399); СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» СНИП 2.04.02-84\* «Свод правил от 27.12.2021 № 31.13330.2021». Применяется с 28.01.2022 г. взамен СП31.13330.2012.

народного хозяйства. В структуре общего потребления водных ресурсов в нашей стране на долю подземных вод приходится около 13%, остальные 87% — на поверхностные воды. Однако по отдельным областям удельный вес подземных вод в общем водопотреблении очень высок. Артезианские воды имеют огромное значение в народном хозяйстве. Пресные воды используются для водоснабжения городов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий и других объектов, минеральные, в зависимости от их состава, могут иметь лечебное значение или использоваться в химической промышленности для извлечения из них компонентов (поваренной соли, бора, йода, брома, лития, калия, вольфрама и др.), термальные воды имеют лечебное и энергетическое значение.

Роль подземных вод в водоснабжении во многих странах мира существенно возрастает. Это связано с рядом преимуществ подземных вод по сравнению с поверхностными, прежде всего их лучшей защищенностью от загрязнения, меньшей подверженностью существенным многолетним сезонным колебаниям, связанным с климатом и водностью отдельных лет. Подземные воды относятся к стратегическому виду водных ресурсов, т. к. по существу остаются единственным надежным источником питьевого водоснабжения населения на период чрезвычайных природных и техногенных ситуаций, а от их наличия и возможности эффективного использования в этих случаях существенно зависит национальная безопасность страны. Значение подземных вод как наиболее защищенных от загрязнения источников питьевого водоснабжения особенно возросло в последние годы в связи с участвовавшими техногенными катастрофами и террористическими актами.

Наличие для каждого населенного пункта надежно защищенного источника питьевого водоснабжения, который может быть использован в чрезвычайных ситуациях, в том числе в критические маловодные периоды, имеет важнейшее значение. Когда возникал дефицит поверхностных источников водоснабжения в связи с маловодьем (Владивосток, Курган и др.), загрязнением поверхностных вод (Чернобыльская катастрофа, Уфимский разлив фенолов, прорыв Стебниковского накопителя рапы калийных солей на р. Днестр, Орловский выброс фекалий и т. д.), всегда возникал вопрос о полном или частичном покрытии возникающего дефицита за счет подземных вод. Надежно защищенные от антропогенного и техногенного загрязнения подземные воды должны рассматриваться как приоритетный источник хозяйственно-питьевого водоснабжения населения; они обладают возможностью годового и многолетнего регулирования водоотбора за счет большой емкости водовмещающих пород.

Водным кодексом Российской Федерации предусмотрено создание резервных источников водоснабжения на базе защищенных от загрязнения месторождений подземных вод. Установлено, что системы хозяйственно-питьевого водоснабжения средних и крупных городов должны базироваться не менее чем на двух независимых источниках. Доля подземных источников в системах централизованного водоснабжения крупных населенных пунктов должна составлять не менее 25–30%. Минимальная гигиеническая норма в период чрезвычайных ситуаций — не менее 30 л/сут на человека. Сейчас доля подземных

вод в системах водоснабжения городов России крайне недостаточна и резко уменьшается с увеличением крупности города. Создание резервных защищенных источников водоснабжения является важнейшей государственной стратегической задачей. Для этих целей могут использоваться и некондиционные подземные воды, требующие специальной водоподготовки. Бурное развитие и совершенствование систем водоподготовки, также с применением обратного осмоса, в последние десятилетия поставили на повестку дня вопрос о расширении использования некондиционных для питьевых целей подземных вод, в том числе грунтовых, в районах, где пресные питьевые воды отсутствуют.

### ***Требования к источникам питьевого водоснабжения за счет подземных вод***

1. Наличие подземных вод, эксплуатационные запасы которых позволяют полностью или частично удовлетворить потребности населения в воде питьевого качества; степень изученности этих запасов, определяющая возможность эксплуатации подземных вод или необходимость их дальнейшего изучения.
2. Качество подземных вод в естественных условиях и в процессе эксплуатации, определяющее возможность их использования для питьевого водоснабжения населения непосредственно или после применения тех или иных промышленных методов (технологий) водоподготовки.
3. Естественная защищенность подземных вод от поверхностного антропогенного загрязнения, возможность и условия создания зоны санитарной охраны водозаборных сооружений.
4. Геолого-экономическая и технологическая изученность и обоснованность строительства и эксплуатации водозаборных сооружений.
5. Допустимая степень воздействия эксплуатации на основные компоненты окружающей природной среды или возможность снижения негативных последствий эксплуатации.

### ***Государственное регулирование недропользования***

Решение вопросов рационального использования и охраны подземных вод от загрязнения и истощения регламентируется системой государственного учета и ведения баланса подземных вод, порядком лицензирования участков недр (подземных водных объектов) для хозяйственного освоения, а также системой государственного мониторинга состояния недр.

В результате взаимодействия структур управления недрами, учета водных ресурсов и контроля за их использованием выявлен существенный дисбаланс между общим количеством и состоянием эксплуатационных запасов, реальной возможностью их рационального использования и фактическим освоением ресурсной базы подземных вод. Наиболее распространенными общими причинами недостаточной освоенности эксплуатационных запасов являются: изменение юридического статуса земельного участка месторождения или

режима землепользования; застройка площадей разведанных месторождений, исключающая возможность строительства водозабора и организации зон санитарной охраны; изменение водохозяйственной, санитарной и экологической обстановки; изменение законодательной базы недропользования и требований действующих нормативных документов к качеству подземных вод и зонам санитарной охраны; экономическая нецелесообразность освоения месторождений.

Постоянно растущее население городских агломераций, усложняющаяся инфраструктура обеспечения жизнедеятельности, риск возникновения опасных техногенных ситуаций делают необходимым организацию резервных источников водоснабжения городов и населенных пунктов в периоды чрезвычайных экологических ситуаций с использованием для этой цели артезианских скважин.

### ЦИКЛЫ РАЗВИТИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Гидрогеология, как и многие другие научные и прикладные дисциплины, возникла и развивалась из необходимости удовлетворения многочисленных запросов народного хозяйства, в том числе такой наиважнейшей отрасли, как **водоснабжение**. С развитием отрасли закономерно изменялись применяемые технологии поисков и разведки, добычи и использования, охраны подземных вод. Историю развития гидрогеологии как науки и, соответственно, водоснабжения за счет подземных вод можно условно разделить на четыре технологических цикла, соответствующих периодам социально-экономического и политического развития страны и общества.

Циклы и периоды изучения подземных вод: 1) накопление опыта использования подземных вод (до конца XVII в.); 2) первые научные обобщения сведений о подземных водах (XVIII — начало XIX в.); 3) формирование основополагающих научно, практически и технически обоснованных представлений о подземных водах (вторая половина XIX — первая половина XX в.); 4) развитие технологичных и высокотехнологичных методов изучения и использования подземных вод (вторая половина XX — начало XXI в.). Краткая характеристика циклов приведена в таблице 5.

#### *Первый технологический цикл — накопление опыта добычи и использования подземных вод*

С давних времен люди использовали подземные воды. При выборе места постройки монастырей, городов проводили разведку на воду: определяли ее прозрачность, вкус, цвет, запах; умели по небольшому числу местных примет выбирать участки для заложения колодцев, разведывали подземные воды, часто отдавая им предпочтение перед поверхностными. Особенно важно это было во времена войн и продолжительных осад городов, когда доступ к поверхностной воде нередко становился затруднительным.

Колодцы рыли вручную, глубина их различна, в основном от 1,5 до 10,0 м, но были и глубокие, достигавшие 50–75 м. Из глубоких колодцев подъем воды осуществлялся желонками при помощи шестов-журавлей, для чего использовались ведра и бадьи. Но были и фонтанирующие, и самоизливные колодцы.

При устройстве соляных промыслов на Руси применялось бурение на воду. Первые упоминания об этом относятся к 1370 г. Существовала рукопись XVI — начала XVII в., в которой излагалось подробное руководство по бурению при солеварении. В это время у людей, работавших на промыслах, уже были правильные представления о влиянии работы одной скважины на дебит другой. Для этого на промыслах ограничивали откачку рассола, чтобы его не испортить из-за притока пресной воды.

Скважины и колодцы располагались в основном в монастырях, у соляных промыслов; использование подземных вод осуществлялось для собственного локального водоснабжения, добычи соли и минеральных (лечебных) вод.

В связи с ростом жителей, строительством городов, развитием ремесел, земледелия и животноводства увеличивалась потребность в питьевой воде. Использованная вода вместе с нечистотами отводилась на поля, в выгребные ямы или в источники.

### ***Второй технологический цикл — первые научные обобщения сведений о подземных водах***

В начале XVIII в. в Европе произошли промышленные революции, что повлекло за собой бурное развитие торговли, транспорта. В конце XVII — начале XVIII в. были созданы первые паровые двигатели, началось развитие промышленности, строились города и поселения. Насупившая индустриальная эра потребовала дополнительных источников воды и энергии, а значит, и новых геологических знаний. Большое значение в изучении подземных вод различных районов России имели экспедиции Российской академии наук, учрежденной в 1724 г.: собирались данные о пресных и минеральных подземных водах, делались описания источников, зародились идеи о связи химического состава грунтовых вод с физико-географическими условиями, появились представления об условиях залегания грунтовых и артезианских вод, понятие артезианских бассейнов, предпринимались попытки классификации подземных вод. Для целей водоснабжения городов и поселений начато бурение скважин до глубины 60–70 м, в результате которого были получены новые данные по геологии и глубоким подземным водам европейской части России.

Бурение скважин производилось при помощи составных буров и буровой вышки с использованием ручного труда при помощи колеса. Способы и объемы добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения. Требовалось увеличение потребления подземной воды для локального и начального централизованного водоснабжения в городах, на кустарных и промышленных производствах — мануфактурах, железоделательных заводах, в горной промышленности и др.

Таблица 5. Характеристика технологических циклов развития водоснабжения за счет подземных вод

Период	Цикл	Характеристика технологий поисков и разведки подземных вод	Социально-экономические и политические причины, вызвавшие переход на новый цикл развития
III в. до н.э. – конец XVII в.	Первый	Умение по небольшому числу местных примет выбирать участки неглубокого залегания грунтовых вод для заложения колодцев, а позднее – кяризов и буровых скважин	Увеличение потребности в питьевой воде в связи с расширением поселений и ростом числа жителей, в том числе для развития земледелия, (орошения) и животноводства
XVIII – начало XIX в.	Второй	Создание Российской академии наук (1724 г.); сбор данных о пресных и минеральных подземных водах, описание источников, представления об условиях залегания грунтовых и артезианских вод, понятие артезианских бассейнов	Развитие первой промышленности, появление паровых машин, строительство городов; увеличение потребления подземной воды за счет использования ее для локального и начального централизованного водоснабжения в городах, на кустарных и промышленных производствах – мануфактурах, железодельных заводах, в горной промышленности и др.
Вторая половина XIX – начало XX в.	Третий	Создание Геологического комитета (1882 г.); закон Дарси (1856 г.); Таблица Менделеева (1869 г.); начало широких гидрогеологических исследований; развитие региональной гидрогеологии; первые широкие обобщения по артезианским и грунтовым водам европейской части России; начало составления сводных гидрогеологических карт для дальнейшего планирования гидрогеологических исследований; начало оценки ресурсов и запасов подземных вод для целей водоснабжения; создание методов, технических средств и технологий, обеспечивающих рост результативности геологоразведочных работ	Зарождение промышленного капитализма и отмена крепостного права; развитие новых территорий, рост населения, бурное развитие торговли, транспорта, крупного производства, промышленности и увеличение площадей орошаемых земель; способы и объемы добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения
Середина XX – XXI в.	Четвертый	Широкие гидрогеологические исследования на научной основе; государственная гидрогеологическая съемка всей территории страны; совершенствование методик гидрогеологических исследований и широкое внедрение методов гидрогеологического моделирования, гидрогеохимических, геофизических, микробиологических, дистанционных (аэровизуальных) и других; прогнозирование истощения и загрязнения подземных вод, используемых для водоснабжения; тотальная оценка и переоценка запасов подземных вод; разработка новых и совершенствование существующих методов оценки ресурсов и запасов, загрязнения подземных вод; разработка методик выбора способов и методов предварительной водоподготовки	Плановая экономика, переход от политики неукротимого роста объема к рациональному пользованию; недостаток чистой пресной воды в крупных городах и промышленных агломерациях за счет загрязнения поверхностных вод, используемых ранее для централизованного водоснабжения; бурный рост городских агломераций с увеличением потребления воды на душу населения; интенсивное развитие гражданского и промышленного строительства, сельского хозяйства – земледелия и животноводства



Характеристика технологий добычи подземных вод и их использования	Характеристика наблюдений за подземными водами и их охрана
<p>Рытье колодцев, устройство галерей, единичное бурение скважин; добыча воды из колодцев вручную при неглубоком залегании, самоизливом или самотеком; основное месторасположение — в монастырях, у соляных промыслов; использование подземных вод для собственного локального водоснабжения, добычи соли и минеральных (лечебных) вод</p>	<p>Регулярные наблюдения и охрана подземных вод не предусматривались</p>
<p>Начало бурения скважин на глубину до 60–70 м при помощи составных буров и буровой вышки с использованием ручного труда при помощи колеса; зарождение ударного и штангового бурения; добыча воды из колодцев и скважин при помощи ручной и конной тяги; использование подземных вод для начального централизованного водоснабжения городов, промышленного производства</p>	<p>Отдельные визуальные наблюдения за уровнем и органолептическими свойствами подземных вод в колодцах и скважинах; некоторые ограничения сбросов и стоков в водоемы и водотоки в городах</p>
<p>Использование вращательного бурения скважин, добыча из которых вначале велась при помощи ручных насосов; постепенный переход на механизированную добычу при помощи паровых двигателей и компрессоров; использование обсадных труб; строительство поисково-разведочных скважин; совершенствование техники бурения скважин на воду; использование подземной воды для централизованного водоснабжения городов и больших поселений, промышленных предприятий и для децентрализованного питьевого и технического водоснабжения отдельных поселений и предприятий</p>	<p>Начало организации стационарных гидрогеологических наблюдений за уровнем и составом подземных вод в эксплуатационных скважинах; начало организации гидрорежимных участков и станций, бурение наблюдательных гидрогеологических скважин; разработка методик зон санитарной охраны водозаборов подземных вод; ограничения сбросов и стоков в водоемы и водотоки, вблизи водозаборных скважин в городах</p>
<p>Развитие бурового дела, бурение глубоких и сверхглубоких скважин, скважин большого диаметра, совершенствование техники бурения скважин на воду; усовершенствование конструкций гидрогеологических скважин; совершенствование методов, технических средств и технологий, обеспечивающих качественный рост результативности геологоразведочных работ и эффективное строительство поисково-разведочных и эксплуатационных скважин; оборудование скважин современными водоподъемными и измерительными устройствами; оборудование устройствами предварительной водоподготовки перед подачей водопотребителю; широкое использование подземной воды для централизованного водоснабжения городских агломераций, крупных промышленных предприятий, там, где существует недостаток поверхностных вод; резервное водоснабжение на случай чрезвычайных ситуаций</p>	<p>Ведение государственного мониторинга состояния недр и локального мониторинга на водозаборах; организация зон санитарной охраны водозаборов подземных вод; лицензирование скважин; ужесточение санитарных и природоохранных требований к качеству питьевой воды и стоков; переход на дистанционные методы наблюдений за подземными водами</p>

Таблица 6. Основные этапы циклов развития водоснабжения за счет подземных вод

Период	Цикл	Научно-технический этап
III в. до н. э. – конец XVII в.	Первый	Умение выбирать участки неглубокого залегания грунтовых вод для заложения колодцев, а позднее – кяризов и буровых скважин
XVIII в. – начало XIX в.	Второй	Создание Российской академии наук (1724 г.), сбор данных о подземных водах до глубины 60–70 м, представления об условиях залегания грунтовых и артезианских вод, понятие артезианских бассейнов
Вторая половина XIX – начало XX в.	Третий	Создание Геолкома (1882 г.), закон Дарси (1856), Периодическая система Менделеева (1869), начало широких гидрогеологических исследований, составление сводных карт для планирования гидрогеологических работ, начало оценки ресурсов и запасов подземных вод для целей водоснабжения. Создание методов, технических средств и технологий, обеспечивающих рост результативности геологоразведочных работ
Середина XX – XXI в.	Четвертый	Государственная геолого-гидрогеологическая съемка всей территории страны, совершенствование методик гидрогеологических исследований и широкого внедрения комплексных методов моделирования, гидрогеохимических, геофизических, микробиологических, дистанционных и других для прогнозирования истощения и загрязнения подземных вод, используемых для водоснабжения; разработка новых и совершенствование существующих методов оценки ресурсов и запасов, подземных вод, тотальная оценка и переоценка запасов подземных вод; разработка методик выбора способов и методов предварительной водоподготовки

Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
<p>Рытье колодцев вручную, устройство галерей, единичное бурение скважин; добыча воды из колодцев вручную при неглубоком залегании</p>	<p>Увеличение потребности питьевой воды в связи с расширением поселений и ростом числа жителей, в том числе для развития земледелия, (орошения) и животноводства</p>	<p>Объемы добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности населения и развивающегося хозяйства</p>
<p>Начало бурения скважин на глубину до 60–70 м при помощи составных буров и буровой вышки с использованием ручного труда при помощи колеса. Зарождение ударного и штангового бурения; добыча воды из колодцев и скважин при помощи ручной и конной тяги</p>	<p>Развитие торговли, транспорта и крупного производства; развитие первой промышленности, строительство городов</p>	<p>Объемы и способы добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности населения и развивающейся промышленности</p>
<p>Использование вращательного бурения скважин, добыча из которых вначале велась при помощи ручных насосов.</p> <p>Постепенный переход на механизированную добычу при помощи паровых двигателей и компрессоров. Совершенствование техники бурения скважин на воду</p>	<p>Зарождение промышленного капитализма и отмена крепостного права; развитие новых территорий, рост населения, бурное развитие торговли, транспорта, крупного производства, промышленности и увеличение площадей орошаемых земель</p>	<p>Объемы, способы и места добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности населения, развивающейся промышленности и сельского хозяйства</p>
<p>Развитие бурового дела, бурение глубоких и сверхглубоких скважин, совершенствование техники бурения скважин на воду; усовершенствование конструкций гидрогеологических скважин; оборудование скважин современными водоподъемными и измерительными устройствами; применение новых композитных материалов; оборудование устройствами предварительной водоподготовки перед подачей водопотребителю</p>	<p>Плановая экономика, переход от политики неукротимого роста объема к рациональному пользованию.</p> <p>Бурный рост городских агломераций с увеличением потребления воды на душу населения; бурное развитие гражданского и промышленного строительства, сельского хозяйства – земледелия и животноводства.</p> <p>Ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий. Лицензирование скважин</p>	<p>Недостаток чистой пресной воды за счет загрязнения поверхностных вод, используемых ранее для централизованного водоснабжения в крупных городах и промышленных центрах; сработка запасов подземных вод на крупных водозаборах, эксплуатирующихся более 25 лет.</p> <p>Ужесточение санитарных и природоохранных требований к качеству питьевой воды и стоков.</p> <p>Переход на дистанционные методы наблюдений за подземными водами</p>

За уровнем и органолептическими свойствами подземных вод в колодцах и скважинах велись только отдельные визуальные наблюдения.

Начались некоторые ограничения сбросов и стоков в водоемы и реки в городах — Петровский указ 1719 г. о том, чтобы не засоряли реки нечистотами; распоряжения: о поддержании чистоты на улицах и чистке навоза со дворов (1737 г.), о запрете засорять дно рек и каналов сплавляемым по ним лесом с неочищенной корой (1750 г.).

### *Третий технологический цикл – формирование научно, практически и технически обоснованных представлений о подземных водах*

Вторая половина XIX — начало XX в. ознаменованы зарождением промышленного капитализма и отменой крепостного права в России, что повлекло за собой развитие новых территорий, бурное развитие торговли, транспорта, крупного производства, промышленности, расширение орошаемых площадей. В связи с этим возникает необходимость более широкого использования подземных вод. Возрастающая потребность получения больших количеств высококачественной воды способствует совершенствованию техники бурения скважин на воду, научно обоснованных методов поисков и разведки подземных вод. На дальнейшее развитие геологической науки и становление гидрогеологии значительное влияние оказали: создание в 1882 г. Геологического комитета; в 1856 г. — открытие закона Дарси, основного закона фильтрации в пористом грунте, являющегося базовым в подземной гидродинамике; в 1869 г. — закона о Периодической системе элементов Менделеева, основополагающего для правильного понимания химии всех водных растворов Земли и базового для геохимии в целом и гидрогеохимии в частности.

Ко второй половине XIX в. сформировались представления о происхождении, составе и распространении подземных вод в верхней части земной коры; сформулированы первые законы; заложены основы изучения региональных закономерностей; появились первые классификации подземных вод, первые гидрогеологические карты. Стали применять вращательное бурение скважин, добыча из которых вначале велась при помощи ручных насосов. Происходит постепенный переход на механизированную добычу при помощи паровых двигателей и компрессоров. Используются обсадные трубы.

В первой половине XX в. начинаются широкие гидрогеологические исследования, развивается региональная гидрогеология, делаются первые широкие обобщения по артезианским и грунтовым водам европейской части России, составляются сводные гидрогеологические карты для дальнейшего планирования гидрогеологических исследований, в том числе для целей водоснабжения. Совершенствуется техника бурения скважин на воду; широко используется подземная вода для централизованного водоснабжения городов и больших поселений, промышленных предприятий и для децентрализованного питьевого и технического водоснабжения отдельных поселений и предприятий.

Способы, объемы и места добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности развивающейся промышленности и растущего населения.

Организируются стационарные гидрогеологические наблюдения за уровнем и составом подземных вод в эксплуатационных скважинах; строятся гидро-режимные участки и станции, бурятся наблюдательные гидрогеологические скважины. Разрабатываются методики организации зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. Ограничиваются сбросы и стоки вблизи водозаборных скважин в городах.

***Четвертый технологический цикл – развитие технологических  
и высокотехнологических методов изучения и использования  
подземных вод***

В послевоенные годы плановая экономика страны была направлена на рост объема производства, освоение целинных и залежных земель, повышение благосостояния народонаселения. Продолжились и расширились гидрогеологические исследования на научной основе; государственной гидрогеологической съемкой ежегодно покрывалось более 550 тыс. км<sup>2</sup> площади; для целей изучения подземных вод бурится свыше 1,5 млн скважин, не считая многочисленных скважин, сооружаемых для мелкого водоснабжения. Для глубокого научного анализа и широкого обобщения материалов по подземным водам опубликовано 45 томов «Гидрогеологии СССР» и 5 сводных томов. В связи с ростом научно-технического прогресса постоянно совершенствуются методики гидрогеологических исследований по поискам и разведке месторождений подземных вод, оценке эксплуатационных запасов и прогнозных региональных ресурсов; способы восполнения, охраны и рационального использования подземных вод; методы прогнозирования гидрогеодинамического и гидрогеохимического состояния подземных вод, связанного с нарастающей эксплуатацией; происходит совершенствование и широкое внедрение методов гидрогеологического моделирования, гидрогеохимических, геофизических, микробиологических, дистанционных (аэровизуальных) и др.; ведется тотальная оценка запасов подземных вод, в том числе и для перспективного водоснабжения планируемого роста населения и развития народного хозяйства. Плановмерно происходит развитие бурового дела, бурение глубоких и сверхглубоких скважин, скважин большого диаметра. Совершенствуется техника бурения скважин на воду; усовершенствуются конструкции гидрогеологических скважин (фильтров, обсадных и водоподъемных труб, оголовков и др.); применяются новые композитные материалы; скважины оснащаются современными водоподъемными и измерительными устройствами.

Из-за неудержимого роста городских агломераций, бурного развития гражданского и промышленного строительства, роста водопотребления на душу населения стал ощущаться недостаток чистой пресной воды и за счет загрязнения поверхностных вод, используемых ранее для централизованного водоснабжения в крупных городах и промышленных центрах, и за счет сработки уровней первых от поверхности эксплуатируемых водоносных горизонтов. Для решения

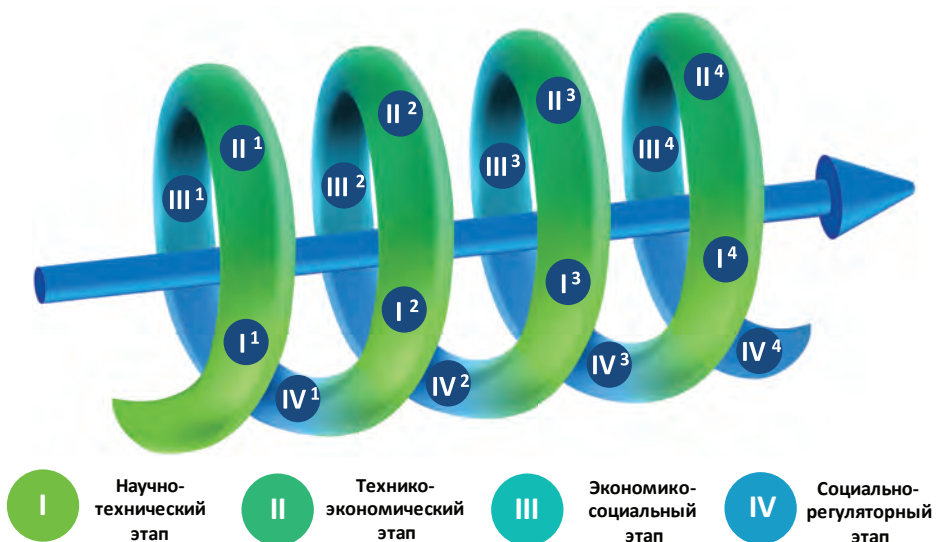
этой проблемы применяется системный подход к изучению, использованию и охране природных ресурсов: разрабатываются и внедряются методы рационального использования вод централизованного водоснабжения, осуществляется переоценка запасов подземных вод, внедряются новые методы эксплуатации подземных вод (например, одновременно из разных водоносных подразделений), методы совместного использования подземных и поверхностных вод, новые методы и методики водоподготовки. Важную роль на случай чрезвычайных ситуаций играет резервное водоснабжение за счет подземных вод.

Рациональное использование и охрана подземных вод контролируются ведением государственного мониторинга состояния недр и локального мониторинга на водозаборах, организацией зон санитарной охраны водозаборов подземных вод, ужесточением санитарных и природоохранных требований к качеству питьевой воды и стоков, лицензированием скважин.

Внедрение компьютерных технологий, применение новых композитных материалов, цифровизация, переход на дистанционные методы управления и наблюдений за подземными водами способствуют повышению эффективности дальнейших научных и технических разработок в области водоснабжения и сохранения водных ресурсов.

### ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ РАЗВИТИЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Каждый цикл развития отрасли обусловлен определенным этапом развития техники и технологий, который дает новый толчок развитию технологий. Последовательное прохождение всех этапов приводит к завершению цикла развития отрасли, после чего цикл повторяется (рис. 26).



- I<sup>1</sup>** – умение по небольшому числу местных примет выбирать участки для заложения колодцев, а позднее – кyarизов и буровых скважин
- II<sup>1</sup>** – рытье колодцев вручную, устройство галерей, единичное бурение скважин
- III<sup>1</sup>** – увеличение потребности в питьевой воде в связи с расширением поселений и ростом числа жителей, в том числе для развития земледелия и животноводства
- IV<sup>1</sup>** – объемы добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности населения и развивающегося хозяйства
- I<sup>2</sup>** – создание Российской академии наук (1724 г.), сбор данных о подземных водах до глубины 60–70 м, представления об условиях залегания грунтовых и артезианских вод
- II<sup>2</sup>** – начало бурения скважин на глубину до 60–70 м при помощи составных буров и буровой вышки с использованием ручного труда при помощи колеса; зарождение ударного и штангового бурения
- III<sup>2</sup>** – развитие торговли, транспорта и крупного производства; развитие первой промышленности, строительство городов
- IV<sup>2</sup>** – способы и объемы добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности промышленности и населения
- I<sup>3</sup>** – создание Геологического комитета (1882 г.), закон Дарси (1856 г.), Периодическая система элементов Менделеева (1869 г.), начало широких гидрогеологических исследований, составление сводных карт для планирования гидрогеологических работ, начало оценки ресурсов и запасов подземных вод для целей водоснабжения; создание методов, технических средств и технологий, обеспечивающих рост результативности геологоразведочных работ
- II<sup>3</sup>** – использование вращательного бурения скважин; постепенный переход на механизированную добычу при помощи паровых двигателей и компрессоров; совершенствование техники бурения скважин на воду
- III<sup>3</sup>** – зарождение промышленного капитализма и отмена крепостного права; развитие новых территорий, рост населения, бурное развитие торговли, транспорта, крупного производства, промышленности и увеличение площадей орошаемых земель
- IV<sup>3</sup>** – объемы, способы и места добычи подземных вод уже не удовлетворяли потребности населения, развивающейся промышленности и сельского хозяйства
- I<sup>4</sup>** – государственная геолого-гидрогеологическая съемка всей территории страны, совершенствование методик гидрогеологических исследований и широкое внедрение комплексных методов для прогнозирования истощения и загрязнения подземных вод, используемых для водоснабжения; разработка новых и совершенствование существующих методов оценки ресурсов и запасов подземных вод, тотальная оценка и переоценка запасов подземных вод; разработка методик выбора способов и методов предварительной водоподготовки
- II<sup>4</sup>** – развитие бурового дела, бурение глубоких и сверхглубоких скважин, совершенствование техники бурения скважин на воду; усовершенствование конструкций гидрогеологических скважин, применение композитных материалов, оборудование скважин современными водоподъемными и измерительными устройствами; оснащение устройствами предварительной водоподготовки перед подачей водопотребителю
- III<sup>4</sup>** – плановая экономика, переход от политики неудержимого роста объема к рациональному пользованию; бурный рост городских агломераций с увеличением потребления воды на душу населения; бурное развитие гражданского и промышленного строительства, сельского хозяйства; ужесточение природоохранного законодательства, отказ от неэкологических технологий, лицензирование скважин
- IV<sup>4</sup>** – недостаток чистой пресной воды за счет загрязнения поверхностных вод, используемых ранее для централизованного водоснабжения в крупных городах и промышленных центрах; ужесточение санитарных и природоохранных требований к качеству питьевой воды и стоков; необходимость организации резервного водоснабжения на случай чрезвычайных ситуаций; переход на дистанционные методы наблюдений за подземными водами

Рис. 26. Эволюция технологий развития водоснабжения за счет подземных вод

Ресурсоэффективность в рамках исторического развития отраслей науки и производства рассматривается как важнейший фундаментальный концепт перехода технологического развития на новый уровень. При этом метод исследования сосредоточен на изучении реакции отрасли как целого на изменяющиеся условия, без подробного описания механизма работы и внутреннего устройства той или иной технологии, т. к. в рамках поставленной задачи это не является первостепенным объектом изучения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Биндеман Н. Н.* Оценка эксплуатационных запасов подземных вод / Н. Н. Биндеман. — Москва : Госгеолтехиздат, 1963. — 216 с.
2. *Бочеввер Ф. М.* Расчеты эксплуатационных запасов подземных вод / Ф. М. Бочеввер. — Москва : Недра, 1968. — 326 с.
3. *Гидрогеология СССР. Т. 1.* — Москва : Недра, 1966. — 424 с. : ил.
4. *Гусев С. Н.* Водоснабжение на базе артезианских скважин / С. Н. Гусев, К. А. Небольсина. — Москва : Колос, 1976. — 119 с.
5. *Журба М. Г.* Методология анализа эффективности действующих водоочистных комплексов / М. Г. Журба, Ж. М. Говорова // ВСТ. — 2009. — № 8. — С. 29–37.
6. *Журба М. Г.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений : в 3 т. : учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Водоснабжение и водоотведение» направления подготовки дипломированных специалистов «Строительство» / М. Г. Журба, Л. И. Соколов, Ж. М. Говорова. — 3-е изд., доп. и перераб. — Т. 1. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2003. — 288 с.
7. *Зекцер И. С.* Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод / И. С. Зекцер; Институт водных проблем РАН. — Москва : Научный мир, 2012. — 374 с.
8. Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 году» / ФГБУ «Гидроспецгеология». — Москва, 2022. — Вып. 45. — 426 с.
9. Информационный бюллетень «О состоянии недр на территории Центрального федерального округа за 2021 год» / ФГБУ «Гидроспецгеология». — Москва, 2022. — Вып. 27. — 162 с.
10. *Каменский Г. Н.* Гидрогеология СССР / Г. Н. Каменский, М. М. Толстихина, Н. И. Толстихин. — Москва : Госгеолтехиздат, 1959. — 366 с.
11. *Киссин И. Г.* Вода под землей / И. Г. Киссин. — Москва : Наука, 1976. — 224 с.
12. *Климентов П. П.* Общая гидрогеология / П. П. Климентов. — Москва : Высш. шк., 1980. — 303 с.
13. *Климентов П. П.* Общая гидрогеология / П. П. Климентов, Г. Я. Богданов. — Москва : Недра, 1977. — 357 с.
14. *Ланге О. К.* Основы гидрогеологии / О. К. Ланге. — Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1958. — 255 с.
15. *Маккавеев А. А.* Словарь по гидрогеологии и инженерной геологии / А. А. Маккавеев. — Москва : Недра, 1971. — 216 с.
16. *Минкин Е. Л.* Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод / Е. Л. Минкин. — Москва : Недра, 1967. — 124 с.



17. Минкин Е. Л. Исследования и прогнозные расчеты для охраны подземных вод / Е. Л. Минкин. — Москва : Недра, 1972. — 112 с.
18. Николадзе Г. И. Улучшение качества подземных вод / Г. И. Николадзе. — Москва, 1987. — 240 с.
19. Новиков Ю. В. Вода и жизнь на земле / Ю. В. Новиков, М. М. Сайфутдинов. — Москва : Наука, 1981. — 184 с.
20. О состоянии природных ресурсов и окружающей среды Московской области : Информационные выпуски за 2011–2015 гг. / Министерство экологии и природопользования Московской области. — Красногорск, Московская область. — 2012–2016.
21. Овчинников А. М. Общая гидрогеология / А. М. Овчинников. — Москва : Гостеолтехиздат, 1955. — 383 с.
22. Плотников Н. И. Подземные воды — наше богатство / Н. И. Плотников. — Москва : Недра, 1976. — 208 с.
23. Плотников Н. И. Эксплуатационная разведка подземных вод / Н. И. Плотников. — Москва : Недра, 1973. — 296 с.
24. Подземный сток на территории СССР / под ред. Б. И. Куделина. — Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1966. — 303 с.
25. Поиски и разведка подземных вод для крупного водоснабжения : метод. пособие. — Москва : Недра, 1969. — 328 с.
26. Советский энциклопедический словарь. — Москва: Сов. энциклопедия, 1987. — 1599 с.

#### *Нормативная и методическая литература*

27. Государственный водный кадастр. Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество : (ежегодное издание) / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии. 2020 год. — Санкт-Петербург, 2021. — 156 с.
28. Закон РФ «Водный кодекс Российской Федерации» от 03.06.2006 № 74-ФЗ.
29. Закон РФ «О недрах» от 21.02.1992 № 2395-1.
30. Закон РФ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» от 30.03.1999 № 52-ФЗ.
31. Классификация запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных подземных вод / МПР РФ. — Москва, 2007.
32. Методические рекомендации по применению Классификации запасов и прогнозных ресурсов питьевых, технических и минеральных вод, утвержденной Приказом Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30 июля 2007 г. № 195.
33. Об утверждении Порядка ведения собственниками водных объектов и водопользователями учета объема забора (изъятия) водных ресурсов из водных объектов и объема сброса сточных вод и (или) дренажных вод, их качества : Приказ Минприроды России от 08.07.2009 г. № 205.
34. Об утверждении требований к структуре и оформлению проектной документации на разработку месторождений подземных вод : Приказ Минприроды России от 27.10.2010 г. № 463.
35. ОСТ 41-05-263-86 «Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре». — Москва : ВСЕГИНГЕО, 1986.
36. Положение об осуществлении государственного санитарно-эпидемиологического надзора в Российской Федерации, утвержденное Постановлением Правительства РФ от 15 сентября 2005 г. № 569.

37. СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий» (зарегистрирован в Минюсте РФ 29.01.2021 г. № 62297).
38. СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов хозяйственно-питьевого назначения» (зарегистрирован в Минюсте РФ 24.04.2002 г. № 3399).
39. СП 31.13330.2021 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения» СНиП 2.04.02-84\* «Свод правил от 27.12.2021 № 31.13330.2021». Применяется с 28.01.2022 г. взамен СП31.13330.2012.

## ВОДООТВЕДЕНИЕ

**Ольга Николаевна Рублевская**

Филиал «Инженерно-инновационный центр»  
Государственного унитарного предприятия  
«Водоканал Санкт-Петербург»

**Александр Иванович Клоков**

Филиал «Водоотведение Санкт-Петербурга»  
Государственного унитарного предприятия  
«Водоканал Санкт-Петербург»

**Александр Евгеньевич Кузнецов**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Российский химико-технологический университет  
имени Д. И. Менделеева»,  
доктор технических наук

---



## ИСТОРИЯ ЗАРОЖДЕНИЯ ОТРАСЛИ

Водоотведение возникает несколько позже водоснабжения и совпадает с началом строительства крупных, в основном культовых, сооружений. Изобретение же канализации, впрочем, как и водопровода, сейчас приписывают римлянам; по общепринятой исторической концепции именно они первыми разработали систему, которая до сих пор не претерпела существенных изменений, если судить о принципе работы. При этом исторически правильнее говорить, что система канализации впервые была выстроена в античной Греции, а затем была заимствована Римской империей.

### *Древний мир*

Самыми известными из культовых сооружений древности являются пирамиды, ставшие символом могущества древнего Египта, — грандиозные усыпальницы фараонов. При проведении археологических раскопок было установлено, что при строительстве пирамид применялась сложная система отведения сточных вод, как открытая, так и подземная. В подземной части пирамиды Хеопса располагался водоотводящий канал-туннель, соединенный с Нилом.

В крупных храмовых комплексах Египта имелась внутренняя водоотводящая сеть из медных труб сечением порядка 4,5 см, изготовленных из листовой меди. Трубы укладывались в полу между плитами известняка. Из труб отводимые воды попадали в закрытые лотки-дрены, вырубленные в каменных плитах во дворе под землей. По дренам сточные воды отводились за границы территории храмов<sup>1</sup>.

Развитие технологий, применяемых как для орошения земель, так и для водоснабжения привело к тому, что в долине реки Инд существовало несколько крупных городов, главные из которых — Мохенджо-Даро, Хараппа, Чанху-Даро и Калибаган.

Санитарно-техническая система протогородов Индии на рубеже III и II тыс. до н. э. состояла из сети каналов и отстойников и была построена тщательнее и продуманнее, чем жилые здания. Например, грязь и нечистоты, прежде чем попасть из домов в выводящий канал, проходили через отстойники, где все твердые вещества оседали и не засоряли каналы. Когда отстойник заполнялся на три четверти, вода из него вытекала в широкие каналы; таким образом, отстойник никогда не переполнялся. Кирпич в каналах и отстойниках

<sup>1</sup> Водоснабжение и водоотведение. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005.

скреплялся особенно тщательно, и для водонепроницаемости в илистый раствор добавляли известь и гипс. У археологов нет ни малейшего сомнения в том, что каналы и отстойники периодически чистили и содержали в безупречном порядке<sup>2</sup>.

В VI–V тыс. до н. э. в Месопотамии закладываются основы системы водоотведения, включающей в себя сеть для бытовых стоков и дренажную сеть для ливневых вод. Во дворцах и жилищных домах устраивались ванны для омовения и системы отведения использованной воды. Во II тыс. до н. э. севернее Вавилона в городе-государстве Мари на реке Евфрат был построен большой дворец площадью 9 тыс. м<sup>2</sup> с обязательными для той эпохи ваннами для омовений и водоотводящей сетью. Позднее во дворце ассирийского царя Саргона была построена более сложная система отвода поверхностных вод, включающая в себя стоки, колодцы, коллектор, туннель, пробитый в скальном грунте на 500 м, для отведения сточных и иных вод.

Разумеется, древние города могли расти лишь до определенных размеров. Считается, что в зависимости от уровня развития оросительных систем и способов хранения и распределения собранного урожая прилегающие к городу поля могли прокормить не более 20 тыс. жителей, хотя из этих правил были исключения, и отдельные мегаполисы разрастались до 200 тыс. жителей.

Возрастающие нагрузки на гидросистемы приводили к их быстрому износу, а утечки воды из каналов — к переувлажнению и засолению почв. По мнению историков, именно это привело к упадку некогда цветущие поселения на реках Тигр, Евфрат, Инд и Нил.

### *Античность*

Культура Древней Греции началась в V тыс. до н. э. на острове Крит. Первые раскопки на острове были проведены в 1876 г. в городе Микены, поэтому найденная культура названа крито-микенской.

Наиболее древней системой водоснабжения и водоотведения на Пелопоннесском полуострове считается именно микенская. Микены — город в Южной Греции, поддерживавший отношения с Египтом, Хеттским царством, городами Кипра и Сирии. Во II тыс. до н. э. на городском акрополе Микен были возведены укрепления и царский дворец. В Кносском дворце на острове Крит была налажена сложная система стабильного водооборота, вода подводилась по подземным трубам, чтобы не допустить ее перегрева и снижения качества, с обтеканием некоторых помещений и созданием там прохладного микроклимата. Система водоотведения для бытовых и ливневых вод Кносского дворца была снабжена вентиляционными шахтами и стояками.

В Микенах и критских городах строились двух- и трехэтажные жилые здания, в домах устанавливались ванны, использованная вода отводилась, улицы были вымощены камнем, под которым были установлены водостоки из керамических труб<sup>3</sup>. Действовали здесь и сложные системы водоотведения по

<sup>2</sup> Линд Г. Вода и город. — М. : Гидрометеиздат, 1984.

<sup>3</sup> Бартонок А. Златообильные Микены. — М. : Наука, 1991.

крупным подземным коллекторам за пределы жилой зоны. Они включали в себя водоотводящую систему труб и резервуары-отстойники. Для водоотведения применяли каналы из обожженного кирпича и камня, а также керамические трубы. В период своего могущества Микены, как и державы Древнего Востока, создавали крупные сооружения для защиты от наводнения, а также для осушения и орошения земель.

Позднее принципы устройства сантехнических помещений и канализационных систем распространились на всю территорию Греции. Так, на севере Греции (на месте метрополии Олимпии) во время раскопок были обнаружены ванные комнаты, отделанные плиткой, и бассейны со стоком. Некоторые из таких бассейнов сохранились до наших дней почти неразрушенными. Подземные трубы делали из глины.

Для греков было очень важно проявить гостеприимство по отношению к путешественникам. Предложить путнику ванную считалось хорошим тоном. О том, что с устройством в Древней Греции водопровода появилась возможность мыться в душе, можно убедиться по рисункам с греческих ваз (рис. 1), но это было бы невозможно без канализации и отведения сточных вод.



Рис. 1. Фрагмент росписи глиняной вазы со сценой из общественных бань

Многие дома в Древней Греции были оснащены туалетами, сток из которых осуществлялся в трубы под улицами. Скорее всего, эти трубы промывались водой. Некоторые из них имели вентиляционные шахты.

Греция являлась культурным лидером Древнего мира и не могла не оказать влияния на своих ближайших соседей. В III в. до н. э. греческий язык в Средиземноморье стал международным, вошло в моду знание греческой литературы, науки, философии.

С середины III в. до н. э. началось постепенное возвышение будущей Римской империи. Изначально империя формировалась под влиянием этрусков, а с III в. до н. э. основное влияние оказывала Греция. Этруски были частью населения Рима и оказали значимое влияние на формирование римской культуры, в том числе римляне позаимствовали у них многие черты архитектуры (древнейший тип римского храма — круглое здание, окруженное портиками из гладких колонн, — является по существу подражанием этрусским зданиям).

Этруски, жители территории, где впоследствии располагался знаменитый Римский форум, привыкли к постоянной борьбе с водой — им приходилось осушать болота, заключать в трубы ручьи и речки, дренировать почву. Именно на основе этих знаний формировались теория и практика обеспечения быстрорастущего города водой и удаления из него жидких отходов.

Первая система канализации в Древнем Риме создается еще в VI в. до н. э., главный коллектор Рима носил наименование «Клоака Максима» (Большая клоака) (рис. 2). Первоначально это была открытая система, являющаяся частью системы канализационных каналов, предназначенных в том числе для осушения низинных болотистых местностей<sup>4</sup>. Позднее, в период Республики, клоака представляла собой туннель шириной 3 и высотой 4 м, дно и стены которого были выложены каменными плитами. Правда, воды из клоаки сбрасывались в Тибр без какой-либо очистки и даже без отстаивания, хотя в других цивилизациях эти технологии присутствовали.

Стоки нечистот в туннель осуществлялись как через вертикальные отверстия, так и через боковые туннели, имеющие различные сечения. В 184 г. до н. э. в Риме были созданы новые клоаки и отремонтированы старые.

Также Большая клоака отводила воду из общественных терм и жидкие нечистоты из общественных туалетов, которых во II в. н. э. в Риме насчитывалось не менее 144 (в большинстве которых было от 20 до 50 мест), городских фонтанов, а также бытовые стоки из частных домовладений.

Первые этажи многих жилых зданий Рима были оснащены «фориками» — общественными туалетами с проточной водой и фонтанчиками.

### *Средневековая Западная Европа*

В качестве систем водоотведения в средневековой Европе повсеместно использовались реки. Наличие равномерно двигавшегося потока воды или рельефа местности, который позволял создать перепад уровней, организовав запруды, давало возможность быстро избавляться от побочных продуктов производства и жизнедеятельности. Если отходы были жидкими или полужидкими, оставалось просто свалить их в водоток или спустить по трубе. В начале XV в. французский король Карл VI призывал прекратить сброс отходов в Сену.

<sup>4</sup> Бойко В. П. и др. Очерки истории водоснабжения и водоотведения (теоретический, практический и социокультурный аспекты) / под ред. В. П. Бойко. — Томск : Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2014.



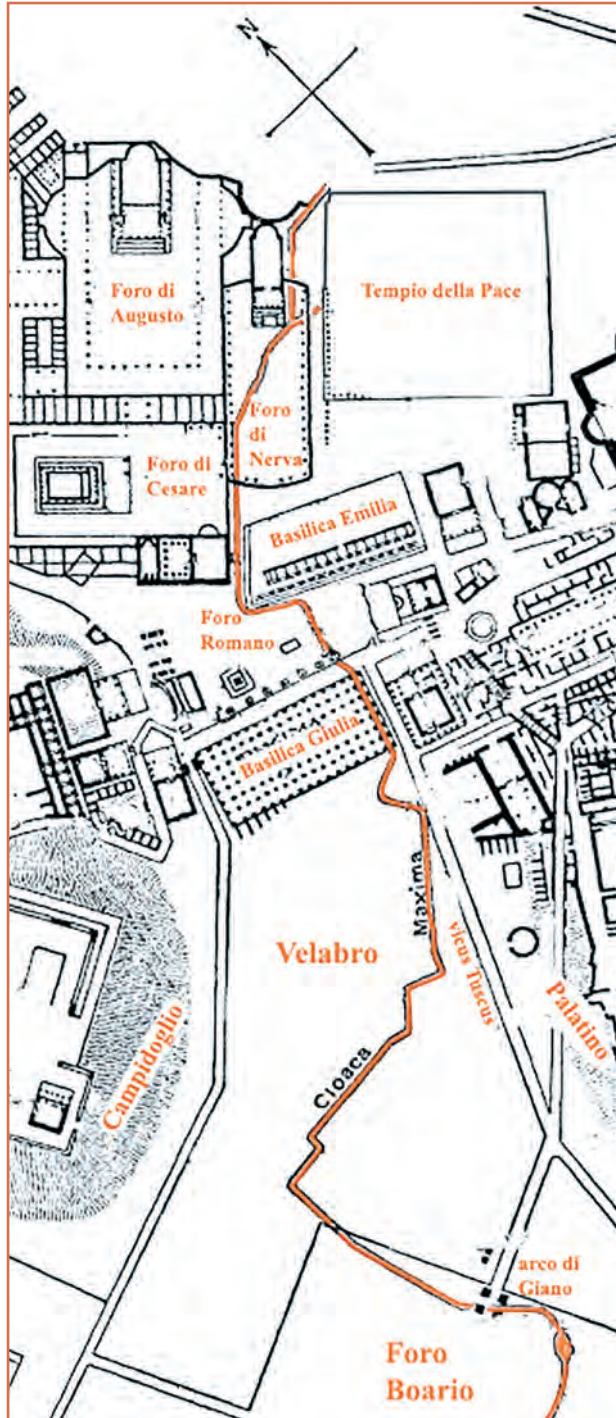


Рис. 2. Клоака Максима на карте Рима

По другую сторону Ла-Манша король Эдуард III издал указ, запрещающий сваливать мусор в Темзу. В 1388 г. английский парламент принял соответствующий закон, но особых результатов эти меры не дали.

В городах помои выливали прямо в окно, городские мостовые имели вогнутую форму, чтобы нечистоты текли посередине улицы. Раз в день по улицам проезжал золотарь со специальной бочкой с колокольчиком, в которую горожане выбрасывали мусор и содержимое ночных горшков.

Со времени падения Западной Римской империи в 476 г. европейцы стали мыться все реже и реже, регресс растянулся на века<sup>5</sup>. Наследие Рима в виде многочисленных общественных бань, с их ваннами, парильнями, лежаками и бассейнами уходит. В начале Средневековья в зажиточных домах еще оставались «мыльни» в полуподвалах, где находились парильни и большие кадки, которые использовались как ванны, а в очень богатых домах эти импровизированные ванны могли быть изготовлены из других материалов; например, Карл Смелый обладал редкостным предметом роскоши — серебряной ванной.

Начиная с XVI в. в Европе почти исчезают общественные бани. Среди западноевропейских историков общепринятой точкой зрения является то, что в это время огромные массивы леса вырубали под нужды сельского хозяйства, в результате чего наступил своеобразный «энергетический кризис». Лес стал слишком дорог, чтобы топить дровами помимо жилища еще и бани. К тому же в позднем Средневековье на Западе широко распространялись венерические заболевания, и власти предполагали, что именно в банях происходило взаимозаражение людей. Им вторили проповедники католиков и кальвинистов, которые считали совместное мытье угрозой моральным устоям. Быть немывтым в средневековой Европе считалось нормальным. Например, королева Испании Изабелла Кастильская (1451–1504) признавалась, что мылась в своей жизни два раза — при рождении и в день свадьбы.

Фернан Бродель (1902–1985) в своих исторических работах отмечал, что в отличие от Западной Европы в странах Восточной Европы «практика пользования общественными банями останется в силе вплоть до последних деревушек»<sup>6</sup>. При этом не стоит полагать, что европейское Средневековье было совершенно «темным» временем, некоторое накопление знаний все же шло. Например, Георг Агрикола (1494–1555) описал восемь видов насосов для подъема воды (вероятно, продолжив труды Витрувия); великий Галилео Галилей (1564–1642) развивал основы гидростатики; французский физик и философ Блез Паскаль (1623–1662) также занимался гидростатикой, хотя его труд «О равновесии жидкостей» был опубликован уже после смерти.

Впрочем, наиболее выдающимся (и известным) деятелем Средневековья был и остается Леонардо да Винчи, который по праву считается одним из основоположников эпохи Возрождения. Наряду с проектами вертолета, велосипеда,

<sup>5</sup> *Бойко В. П. и др.* Очерки истории водоснабжения и водоотведения...

<sup>6</sup> *Бродель Ф.* Структуры повседневности: возможное и невозможное. — Т. 1: Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV–XVIII вв. ; пер. с фр. — М. : Прогресс, 1986.

различных сложных и простых механизмов в своих трудах он рассмотрел вопросы, которые в наше время принято относить к гидравлике. Почти четыре столетия его работы в этой области не были известны, и только в конце XVIII в. был опубликован его трактат «О движении и измерении воды» (на русском языке он вышел в 1824 г.). В работе были рассмотрены способы измерения скорости движения воды в реках и каналах, плавание тел и истечение жидкости через отверстия, меандрирование речных русел и многие другие проблемы гидравлики. Именно Леонардо да Винчи был приглашен ко двору французского короля Франциска I в 1516 г. Париж уже тогда утопал в экскрементах. Это подвигло Леонардо на изобретение унитаза (рис. 3), фекалии из которого должны были смываться водопроводной водой в канализацию. Правда, как и большинство других изобретений Леонардо, это тоже никогда так и не было воплощено по многим причинам: например, для него нужны были водопровод и канализация, а с ними были проблемы.

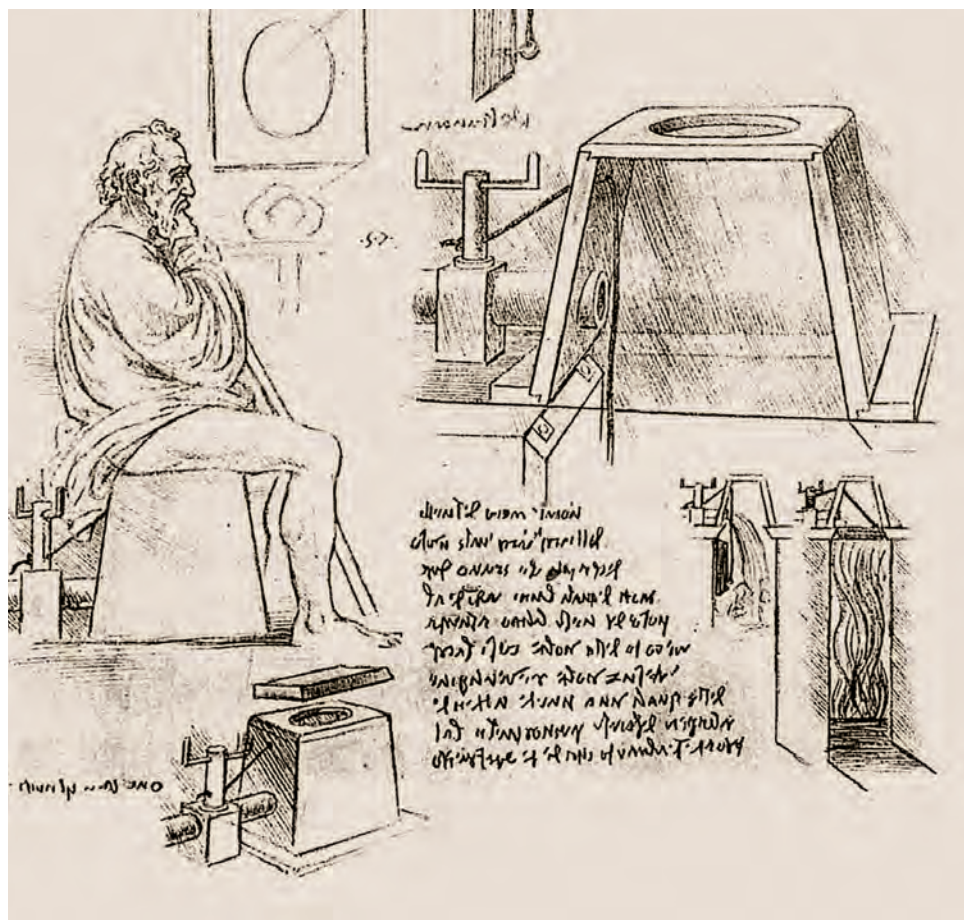


Рис. 3. Унитаз конструкции Леонардо да Винчи

В 1764 г. некто Ла Морандьер описывал окрестности Версальского дворца так: «Парки, сады и сам замок вызывают отвращение своей мерзостной вонью. Проходы, дворы, строения и коридоры наполнены мочой и фекалиями; возле крыла, где живут министры, колбасник каждое утро забивает и жарит свиней; а вся улица Сен-Клу залита гнилой водой и усеяна дохлыми кошками»<sup>7</sup>. Неудивительно, что в 1889 г. был принят специальный закон об очистке города.

По другую сторону Ла-Манша общественная канализация также находилась в удручающем состоянии. Из немногочисленных источников того времени до нас, например, дошла жалоба, датированная XIII в., обитателя одного из лондонских кварталов Гилдхолла на то, что управитель этого муниципального образования позволил завалить местную речушку Флит экскрементами до такой степени, что течение в некоторых местах прекратилось (река Флит была заключена в трубу в 1733 г.). Кто-то обвинял 14 семей, обитателей улицы Фостер-Лейн, что они выбрасывали нечистоты и выплескивали мочу непосредственно из окон. Даже в 1827 г. газеты писали, что Темза «нагружена содержимым более чем 130 городских канализационных коллекторов, дренажными водами, текущими с мусорных свалок и от навозных куч, стоками, сбрасываемыми больницами, скотобойнями, красильнями, свинцовыми предприятиями, керосиновыми заводами, мыловарнями, фармацевтическими фабриками и мануфактурами, а также всевозможными разлагающимися отходами животного и растительного происхождения».

На этом фоне общий уровень гигиены Российской империи мог показаться сравнимым с райским. В статье «Состояние столичного города Москвы 1785 года» неизвестный автор XVIII в. отмечал: «...но вообще Москва, по пространству и высоте места, множеству садов, имеет всегда здоровый воздух и более нужных к сохранению здоровья пособий, нежели бы в столь просторном городе ожидать можно было». Среди «нужных к сохранению здоровья пособий» в Москве, например, насчитывалось 64 общественные и 756 домовых бань, а также 113 цирюлен. Население города в то время составляло примерно 300 тыс. человек.

### *Русь (Россия)*

В русских городах существовали системы водоотведения как для бытовых сточных вод, так и для дождевых стоков. Так, при раскопках дворца Андрея Боголюбского (великий князь Владимирский; годы правл. 1157–1174)<sup>8</sup> вблизи города Владимира была найдена площадь, вымощенная белокаменными плитами. Дождевые воды отводились водостоками, выполненными из тесаного белого камня. Похожая водосточная система имела и в других городах, где стояли каменные крепости и соборы. Например, в Киево-Печерской лавре имелся канал XII в., предназначенный для отвода сточных вод в реку Днепр.

<sup>7</sup> Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге / под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. В. Кармазинова. — СПб. : Новый журнал, 2008.

<sup>8</sup> Водоснабжение и водоотведение. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005.

В низинных местах Москвы и других крупных городов использовали дренажи, которые представляли собой каналы глубиной порядка 0,2 м, перекрытые обрезками стволов деревьев, на которые сверху укладывали жерди. Дренаж становился «закрытым», и по осушенному участку можно было ходить.

В XV–XVI вв. для дренажа стали использовать деревянные трубы, изготавливаемые из стволов деревьев, расколотых вдоль, из которых выбиралась сердцевина. Затем из половинок складывали дренажную трубу и скрепляли трубы по принципу «шип–паз», на поворотных участках стыки обматывали берестой или же строили деревянные поворотные колодцы. Такие колодцы найдены в Москве, Новгороде и других крупных русских городах. Трубы прокладывали с определенным уклоном, если же самотечного стока до реки или рва осуществить не удавалось, то у каждого дома вкапывалась в землю бочка-водосборник, от которой трубопровод шел к специальным поглощающим колодцам, прорытым через водонепроницаемый слой до лежащего ниже слоя песка, поглощающего отводимые воды.

В это же время (XV–XVI вв.) в Москве создаются крупные водосточные каналы, облицованные камнем или кирпичом, иногда укрепленные дубовыми бревнами.

Сброс сточных вод производился в реки или рвы, что, разумеется, способствовало общей антисанитарии, но жизнь Руси сильно облагораживало широкое распространение бань, как личных, так и общественных. Законодательство требовало еженедельного посещения бани солдатами и арестантами.

В период правления Петра I (в 1699 г.) издается Указ «О наблюдении чистоты в Москве и о наказании за выбрасывание сору и всякого помету на улицы и переулки». Документ обязывал жителей столицы мусор на улицы не выбрасывать, следить за чистотой дворов и мостовых, а все отходы вывозить подальше за пределы города и засыпать землей. Надзор за санитарным состоянием улиц и водостоков был возложен на Приказ земских дел, а затем — на полицию, созданную в 1721 г. Вдоль вымощенных камнем улиц устраивались каналы — водоприемники для отвода поверхностных, дождевых и сточных вод. В 1770 г. генерал Бауэр по указу императрицы Екатерины II возглавил проведение работ по строительству подземных водосточных труб в Петербурге. Были построены кирпичные закрытые каналы шириной 0,9 м и высотой 1,2 м. Эти каналы имели достаточный уклон для отвода сточных вод к реке Неве. Вода в водостоки попадала через ливнеприемники с железными решетками. Во второй половине XVIII в. в Петербурге делали сеть для отвода дождевых стоков в виде деревянных пластин сечением 0,5 × 0,5 или 1,4 × 1,4 м. В условиях постоянной увлажненности деревянные коллекторы служили, как и в Новгороде, очень долго, до 200 лет. Минимальный уклон коллектора принимался 0,003, максимальный — 0,01.

Перед выпуском сточных вод в реки сооружались грубые фильтры для осветления воды — песколовки — и две камеры, заполненные булыжниками. В последней камере обеспечивалось движение воды через слой камней снизу вверх. Для эксплуатации и ремонта водоотводящей сети устраивались через

каждые 60 м смотровые колодцы. В конце первой трети XIX в. в Петербурге протяженность подземных водостоков в два раза превышала общую длину водостоков в Париже и достигала 95 км.

В Москве также была построена система водосточных подземных каналов. Поверхностные воды отводились в отстойные ямы, а затем — в главный резервуар (коллектор) под Трубной площадью. Перед выпуском стоков в реки Неглинную и Москву их сливали в резервуар-отстойник, который действовал только в теплое время года. Осенью вода из отстойника удалялась, а зимой отстой вывозился на поля для их «утучнения» (удобрения) или для засыпки оврагов.

Работы по прокладке московской канализации начались в сентябре 1893 г., а в 1898 г. вступила в строй ее первая очередь, к системе было присоединено 219 домовладений. Вода отводилась на Люблинские поля орошения, где проходила почвенная очистка стоков, также поля использовались для выращивания сельскохозяйственных культур.

С 1914 г. из-за значительной перегрузки поля орошения были переведены на режим полей фильтрации, т. е. без выращивания сельскохозяйственных культур, там были оборудованы химическая и биолого-бактериологическая лаборатории.

В таблице 1 приведены основные исторические вехи развития водоотведения как отрасли, а в таблице 2 — основные этапы развития канализационного хозяйства Москвы.

Таблица 1. Развитие отрасли — основные исторические события

Дата	В России	В мире
VI–V тыс. до н. э.		В Месопотамии закладываются основы системы водоотведения, включающей в себя сеть для бытовых стоков и дренажную сеть для ливневых вод
VI в. до н. э.		Первая система канализации в Древнем Риме, главный коллектор которой носил наименование «Клоака Максима»
XII в.	Системы канализации во Владимире, Киево-Печерской лавре и др.	
XV в.	Использование деревянных дренажных труб, изготовленных из цельных стволов деревьев	Первые попытки европейских монархов прекратить сброс сточных вод в реки (Карл VI, фр.; Эдуард III, англ.)
XVI в.	В Москве создаются крупные водосточные каналы, облицованные камнем или кирпичом	Уничтожение общественных бань в Европе

Таблица 2. История канализации Москвы

Дата	Событие
1699 г.	Указ Петра I «О наблюдении чистоты в Москве...»
1770 г.	Указ Екатерины II по строительству подземных водосточных труб (возглавил генерал Бауэр)
1874 г.	Представление в Городскую думу проекта штабс-капитана М. А. Попова «Проектные предначертания канализации г. Москвы»
1892 г.	Утверждение проекта постройки канализации в Московской городской думе
1893 г.	Начало работ по прокладке канализации в Москве
1898 г.	Запущена первая очередь московской канализации
1914 г.	Люблинские поля орошения были переведены на режим полей фильтрации. Создание Люберецких полей фильтрации
1929 г.	Ввод в эксплуатацию первой станции интенсивных методов очистки городских сточных вод (Кожуховская станция аэрофильтрации)
1940 г.	Построены районные очистные станции аэрации – Филевская, Закрестовская и Люблинская
1950–1952 гг.	Запуск Курьяновской станции аэрации с биологической очисткой
1970-е гг.	Протяженность городской канализационной сети составляла 5 тыс. км
1965–1980 гг.	В эксплуатацию вводилось более 70 км канализационных сетей в год
XXI в.	Мосводоканал приступил, развернув масштабные работы по модернизации канализационного хозяйства, к совершенствованию технологий очистки сточных вод, обработки и утилизации осадков, внедрению зеленых технологий

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ

Говоря об эволюции, мы подразумеваем процесс последовательного развития чего-либо, в нашем случае — технологий, связанных с водоотведением, канализованием сточных вод и их очисткой. Однако если брать шкалу времени, то невозможно говорить о плавной эволюции технологии. Во-первых, зарождение отрасли происходило в разных частях света в различное время и независимо; во-вторых, периоды расцвета сменялись временами упадка (яркий пример тому — средневековая Европа) или просто гибели высокоразвитой цивилизации.

Условно развитие можно разделить на Древний мир, Средние века и Новое время, именно этой последовательности и будем придерживаться в дальнейшем:

I — Древний мир: строительство первых деревянных открытых и подземных водостоков для отвода нечистот, зарождение гидротехники;

II — Средние века: упадок технологий; конец Средневековья и Ренессанс — начало технического прогресса с развитием технологий и средств производства,

первые правовые документы для борьбы с антисанитарией; Петровский указ (1699 г.) о запрете сброса в реки нечистот; начало мощения улиц и санитарное благоустройство городов со строительством централизованного отвода сточных вод;

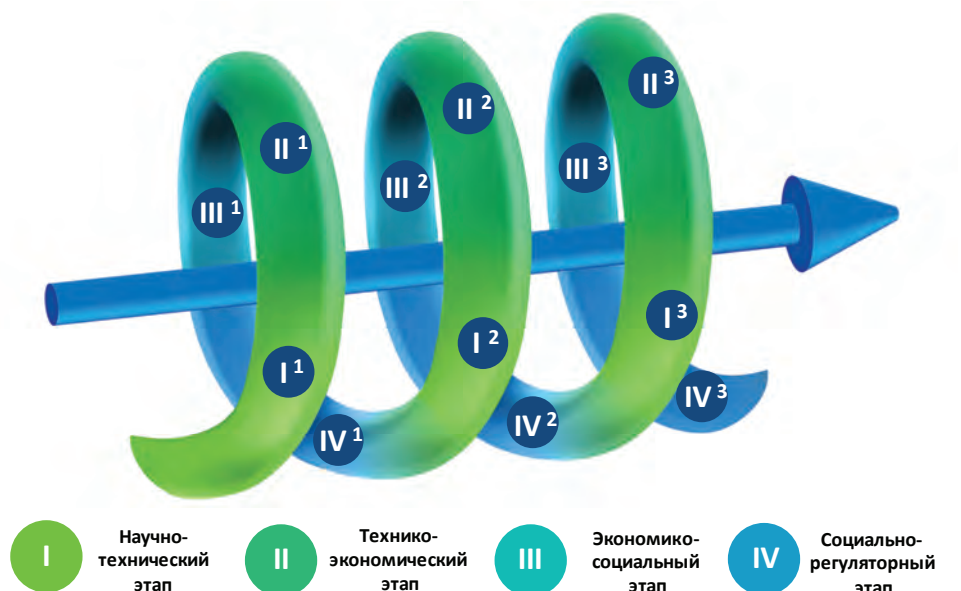
III — промышленная революция как интенсивный период развития водоснабжения: зарождение промышленного капитализма в России и разрушение крепостного строя создают технические предпосылки устройства систем водоотведения; выход на современный уровень технологий очистки сточных вод с применением новейших методов биологической очистки и сооружений по обработке осадков сточных вод.

Можно выделить основные этапы развития отрасли водоснабжения (табл. 3, рис. 4) с циклическими переходами от простейшего к высокотехнологичному промышленному производству.

Таблица 3. Основные циклы развития отрасли водоснабжения

Цикл	Научно-технический этап	Технико-экономический этап	Экономико-социальный этап	Социально-регуляторный этап
Первый (Древний мир)	Отсутствие канализации	Обустройство самотечных водоотводов в реки и рвы; деревянные водостоки открытого типа	Появление крупных поселений, повышение плотности населения	Рост городов; высокая потребность в отведении сточных вод от частных домов и общественных сооружений
Второй (Средние века и эпоха Возрождения)	Устройство первых домовых канализаций; развитие общесплавной и раздельной канализаций	Сброс стоков без очистки; строительство первых сооружений по хранению осадков сточных вод	Нехватка чистой воды вследствие загрязнения рек нечистотами в местах массового производства и плотного проживания людей, высокая смертность, эпидемии	Борьба с антисанитарией, Петровский указ 1699 г., мощение улиц и отвод нечистот; первые канализации закрытого типа; зарождение промышленности
Третий (от промышленной революции до наших дней)	Повсеместное устройство канализационных систем, использование технических средств и новых материалов	Рост промышленного производства; активное строительство централизованных систем водоотведения и очистки сточных вод	Городские канализации и очистные сооружения; очистка промышленных сточных вод	Переход к рациональному пользованию водными ресурсами; санитарное и природоохранное законодательство по сточным водам





**I** – отсутствие канализации

**II<sup>1</sup>** – обустройство самотечных водоотводов в реки и рвы; деревянные водостоки открытого типа

**III<sup>1</sup>** – появление крупных поселений; повышение плотности населения

**IV<sup>1</sup>** – рост городов; высокая потребность в отведении сточных вод от частных домов и общественных сооружений

**I<sup>2</sup>** – устройство первых домовых канализаций; развитие общесплавной и раздельной канализаций

**II<sup>2</sup>** – сброс стоков без очистки; строительство первых сооружений по хранению осадков сточных вод

**III<sup>2</sup>** – нехватка чистой воды вследствие загрязнения рек нечистотами в местах массового производства и плотного проживания людей, высокая смертность, эпидемии

**IV<sup>2</sup>** – борьба с антисанитарией, Петровский указ 1699 г.; мощение улиц и отвод нечистот; первые канализации закрытого типа; зарождение промышленности

**I<sup>3</sup>** – повсеместное устройство канализационных систем, использование технических средств и новых материалов

**II<sup>3</sup>** – рост промышленного производства; активное строительство централизованных систем водоотведения и очистки сточных вод

**III<sup>3</sup>** – городские канализации и очистные сооружения; очистка промышленных сточных вод

**IV<sup>3</sup>** – переход к рациональному пользованию водными ресурсами; санитарное и природоохранное законодательство по сточным водам

Рис. 4. Эволюция технологий отрасли водоотведения

### Первый технологический цикл – водоотведение в Древнем мире

В Месопотамии изготавливали глиняные канализационные трубы, ранние образцы которых были найдены в древних городах Ниппур и Эшнунна, а также в Белом храме, располагавшемся в Уруке, крупнейшем из сельскохозяйственных поселений. Там же обнаружили и первые образцы туалетов, построенных из кирпича. Глиняные канализационные трубы использовались для удаления сточных вод с участков и сбора дождевой воды в колодцы. При археологических

раскопках Мохенджо-Даро (территория современного Пакистана), являвшегося крупнейшим древним городом долины Инда и современником Египта и Месопотамии, были обнаружены канализационные трубы одной из самых ранних систем водоотведения, существовавшей в IV тыс. до н. э.

Начиная с III тыс. до н. э. в хеттском городе Хаттуса (современная территория Турции) для отведения сточной воды применялись глиняные трубы, сегменты которых легко снимались и заменялись во время чистки.

Древние азиатские города (такие как Вавилон (II–I тыс. до н. э.), Ниневия<sup>9</sup> (конец VIII — VII в. до н. э.) и другие) имели особые сети подземных водостоков. Большим каналом для отвода крови жертвенных животных был снабжен Соломонов храм. Сточные воды этих городов отводились в овраг Кедрона, затем — частично в водные протоки Евфрата и Тигра, а частично и на поля для полива растений. Этот факт свидетельствует о том, что вторичное использование сточных вод было хорошо знакомо людям древних цивилизаций. Нередко такую воду они предварительно отстаивали, очищали.

В Древней Греции канализационные сети существовали во многих городах: Афинах, Олимпии, Агригенте, Сиракузах, на острове Самос. Хорошо организованная система отвода сточных вод и ливневых канализационных каналов работала в древнем городе Кносс на острове Крит. В XVIII в. до н. э. здесь применялись унитазы со смывом. В Афинах была не только канализационная сеть — сточные воды также использовались для полива садов. Вода отводилась из зданий, где существовали гимнастические залы, оснащенные ванными комнатами с горячей и холодной водой. В домах были туалеты, сток из которых попадал в сточные трубы под улицами. Скорее всего, эти трубы промывались водой. Некоторые из них имели вентиляционные шахты.

Большое внимание уделялось в разных древних цивилизациях вопросам гигиены и чистоты. В домах состоятельных египтян имелись предназначенные для купания помещения с квадратной плитой из известняка в углу. На эту плиту вставал хозяин, а слуги поливали его водой. Сточная вода стекала в большой бак под полом или по терракотовой трубе вдоль стены в бак на улице. Затем рабы выливали из него воду. Очисткой водостоков в Египте занимались осужденные преступники.

Иудеи во время религиозных служений и обрядов омовения использовали чистую воду, поэтому в Иерусалиме существовали две отдельные системы водоснабжения и водоотведения. Чистая вода подавалась для удовлетворения религиозных и гигиенических потребностей, а использованная сточная вода с улиц и домов отводилась через дренажные системы по специальным каналам в коллекторы, где она хранилась, а затем использовалась для поливки полей и садов. Твердые отходы вывозились на телегах через специальные ворота.

По мере развития Рима в нем зарождалась система канализации, бравшая свое начало от «Клоаки Максима» («Cloaca maxima») (рис. 5) — уникальной античной системы дренажа воды. Это одно из самых выдающихся сооружений

<sup>9</sup> Ниневия — столица Ассирийского государства, находилась на территории современного г. Мосул (Ирак).

древности было построено этрусскими инженерами при Тарквинии Старшем (правил с 616 по 579 г. до н. э.). Изначально большой открытый канал<sup>10</sup> служил для осушения низин между холмами Палатин и Капитолий. Но впоследствии к нему стали пристраивать уличные сточные каналы, и было решено сделать Большую клоаку закрытой, облицевать камнем и спрятать под землей. Клоака была огромной: длиной около 1 км, шириной до 3 м и глубиной до 4 м. Смотрители передвигались по ней на лодках. Сточные воды направлялись из «Клоаки Максима» в реку Тибр. Позднее сеть городских канав расширялась, и часть из них имела собственные водостоки. Таким образом, Клоака играла роль главного коллектора общесплавной системы.



Рис. 5. Большая клоака — часть античной системы канализации в Риме

Домовой канализации у римлян не было. Сначала они пользовались для отправления естественных надобностей переносными сосудами из глины и металла, которые по утрам опорожнялись в уличные каналы (рис. 6). Позже, во времена империи, дома римлян были снабжены ретирадниками<sup>11</sup>, которые были найдены в Помпеях и Поццуоли. В I–IV вв. н. э. в Древнем Риме появились первые общественные туалеты — латрины и форики<sup>12</sup>.

<sup>10</sup> Николаев И. С. Акведуки античного Рима. — М. : Принт-Сервис, 2011.

<sup>11</sup> Ретирадники, или «ретирадные места» (а то и «ретирады»), — это первые туалеты: деревянные домики с дыркой в полу над выгребной ямой.

<sup>12</sup> Латрины (лат. *latrina* от лат. *lavatrina*) — баня, рукомойник; форики (от лат. *forica*) — общественная уборная.



Рис. 6. Руины древней канализации в Риме

В далекие прошлые времена люди искусно владели самыми разными способами добычи и проведения воды к местам своих поселений и ведения сельского хозяйства. Для этого они успешно развивали и совершенствовали технику, пройдя путь от использования ручных инструментов до изобретения архимедова винта, колеса тимпана и сооружения многокилометровых акведуков. Древние ученые впервые описали многие важные явления и наблюдения о воде, впоследствии получившие свое развитие в трудах ученых времен Средневековья. Опыт древнейших цивилизаций в использовании воды человеком был задействован в последующие исторические эпохи и циклы развития водоснабжения и водоотведения.

На Руси в городах издавна устраивались водостоки. При раскопках дворца князя Андрея в Боголюбове их обнаружили на дворцовой площади, вымощенной белокаменными плитами. Такие же постройки имелись и в городе Галиче, а значит, и в нем могла быть похожая водосточная система. В Новгороде археологи раскопали канал из бревен, датируемый XII в. Предположительно он использовался для поглощения стоков в грунт или, наоборот, для осушения почвы. К более позднему периоду — XIV в. — относится канал, служивший для удаления сточных вод, из обтесанных пластин толщиной 10 см, шириной 38 см и высотой 70 см. Боковые стенки канала скреплены снаружи досками, а сверху имеют распоры из брусьев, вдолбленных в эти доски. Дощатое дно скреплено со стенками штырями. Верх был покрыт двумя пластинами и берестой.

Трубопроводы для разных целей прокладывались и в Москве. Когда во времена Дмитрия Донского в 1367 г. вокруг Кремля возводили первые каменные стены с башнями, обнаружили длинную водосточную трубу (до 200 пог. м).

Она была проложена от центра крепости по бывшему рву Ивана Калиты к Москве-реке.

Свои системы отведения сточных вод, видимо, имели и монастыри. К примеру, в Киево-Печерской лавре в овраге между ближними и дальними пещерами устроили канал для удаления сточных вод в Днепр. Вероятно, устройство подобных сточных каналов на Руси было делом обычным и повсеместным.

### Второй технологический цикл — прединдустриальный. Эпоха Средневековья и Ренессанс

В Средние века значение санитарно-инженерных сооружений было снижено. Отчасти это объяснялось пренебрежительным отношением ранних христиан ко всему римскому: купание в тех же термах, которые они считали рассадниками разврата, представлялось чем-то нечестивым и греховным. Но превосходные санитарно-инженерные сооружения римлян превращались в развалины еще и потому, что в Средневековье их просто не на что было содержать. Отсутствие в городах организованного водоотведения порождало жуткую антисанитарию, которая постепенно вытесняла античные представления о здоровье и чистоте человеческого тела, жилища, дворов и городских улиц.

Почти повсеместно нечистоты выбрасывались и выливались прямо на улицу — под них выделялись немощные проулки и задние дворы. Эти небольшие естественные водотоки служили для отвода сточных вод. В Лондоне водотоки и желоба для сточных вод называли «питомниками» (каналами), в Париже — «разделенными улицами», потому что протекавшие посередине улицы сточные воды разделяли ее на две половины. Эти каналы и ручьи между домами вытекали на мостовые. Грязь с улиц не убиралась, а только накапливалась. Выгребные ямы стали выкапывать в IX–X вв.; хотя их стены и выкладывали камнем или деревом, дно оставалось земляным и поглощало нечистоты. Нередко это обстоятельство становилось причиной загрязнения подземных вод. Отходы и жидкие стоки от производства ремесленных мастерских и мануфактур напрямую сбрасывались в водоемы через водотоки либо по трубам.

Перенаселенность городов в средневековой Европе вкупе с антисанитарией приводила к пандемиям, которые уносили миллионы человеческих жизней (чума Юстиниана 541–542 гг., Черная смерть 1347–1351 гг.). Преобладала высокая младенческая и детская смертность. Отношение к вопросам санитарии начало меняться в XII в. А первые мостовые из каменных плит появились в Париже в 1182 г. Гюгом Обирдом в 1370 г. была спроектирована и построена на Монмартре первая 300-метровая закрытая канализационная система. Она не просто принимала сточные воды, но и сдерживала зловоние, исходившее от сточных вод. В Праге к мощению улиц приступили в XIV–XV вв., в немецком Нюрнберге — только в XV в. В целом мощение городов распространялось медленно.

В государствах средневековой Европы начинают издаваться первые документы для борьбы с антисанитарией. В начале XV в. французский король Карл VI призывал прекратить сбрасывать отходы в Сену. В 1533 г. в Париже было издано предписание об обязательном устройстве выгребов в домах и о периодическом

их опорожнении за определенную таксу. Ручей Менильмонтант в Париже, впадавший некогда в Сену, был перекрыт сводом и превращен в водосточный канал. К XVII столетию протяженность Парижской водосточной сети увеличилась до 3 км. В Средние века появились простейшие отхожие места, стала использоваться вода для их промывки.

По другую сторону Ла-Манша король Эдуард III издал указ, запрещающий сваливать мусор в Темзу. В 1388 г. английский парламент даже принял соответствующий закон. Позднее, в 1500 г., в Англии вышел указ о создании комиссии по стокам и об обязательной чистке домовладельцами участков сточных канав около их домов<sup>15</sup>. Однако средств для оплаты работы комиссии не предусматривалось, из-за чего она так и не была сформирована. Только в 1622 г. на ее содержание решили направить штрафы за невыполнение указа.

Магистрат Берлина выпустил указ, по которому каждый крестьянин, приезжающий в город за покупками, должен был на обратном пути загрузить телегу нечистотами и вывезти их за город. В хорватском городе Дубровнике, известном в Средневековье как Рагуза, были установлены правила для строительства септиков и водоотводных каналов. В XIV–XV вв. в этом городе построили городскую канализационную систему.

Средние века вошли в историю водоснабжения и водоотведения как период накопления теоретических и практических знаний. В это время были заложены основы теории гидравлики и созданы водоподъемные машины, которые сыграли важнейшую роль в устройстве централизованного водоснабжения городов, в разы увеличив скорость и объемы подачи воды. Средневековье заставило государства Европы сделать первые шаги на пути к санитарному благополучию городов.

### **Третий технологический цикл — индустриальный. Промышленная революция и дальнейшее развитие технологий**

Эволюционный период в развитии водоснабжения и водоотведения наступил на волне начавшейся промышленной революции. Глобальные изменения в обществе со второй половины XVIII в. и продолжавшиеся в течение всего XIX в. были связаны со стремительным ростом производительных сил и появлением крупной машинной индустрии. Они происходили в разных странах постепенно, но почти повсеместно возникала острейшая потребность в увеличении объемов подачи воды, которая требовалась для развития водоемких производств и быстрорастущего населения городов.

#### *Развитие науки и техники*

Традиционное использование воды европейцами из шахтных колодцев, естественных родников и водоемов уже не удовлетворяло былые потребности городов — наступал период освоения более удаленных источников водоснабжения, и для подачи воды из них требовалась новая, более совершенная техника.

<sup>15</sup> Бойко В. П. и др. Очерки истории водоснабжения и водоотведения...

Ее появление базировалось на достижениях науки предыдущего периода — научной революции, охватившей Европу с середины XVI до конца XVII в. В это время интерес общества к естественным наукам был очень высоким, что подтверждает появление первых инженерно-технических школ: в Оксфорде к 1660 г. научный кружок был преобразован в Королевское общество, Людовик XIV в 1666 г. основал Французскую королевскую академию наук.

По всей Европе существовали уже десятки университетов, где работали ученые, среди которых было немало тех, кто к концу XVIII в. преумножили знания о физических свойствах воды: максимальной плотности при температуре, равной 4°С (1772 г., швейцарский геолог Жан-Андре Делюк (1727–1817)); незначительной сжимаемости (1771 г., британский физик Джон Кантон (1718–1772)); температурном расширении воды на 4% от начального объема при нагревании от 0°С до кипения (1736 г., голландский физик Питер ван Мушенбрук (1692–1761)); капиллярном поднятии воды (1670 г., итальянский ученый Джованни Альфонсо Борелли (1608–1679)); самой высокой удельной теплоемкости воды по сравнению с другими жидкостями и твердыми телами (русский физик немецкого происхождения Георг Вильгельм Рихман (1711–1753), французский ученый Антуан Лоран Лавуазье (1743–1794) и упомянутый Ж.-А. Делюк); наибольшем значении скрытой теплоты испарения, а также образовании 1700 объемов пара из одного объема воды, описанном шотландским инженером и изобретателем-механиком Джеймсом Уаттом (1736–1819); плотности водяного пара меньше плотности воздуха (британский физик Исаак Ньютон (1643–1727)).

Французский математик и инженер-гидравлик Анри де Пито (1695–1771) в 1732 г. в трудах Французской королевской академии наук опубликовал статью, в которой предложил измерять скорости движения жидкостей новым прибором — трубкой Пито; она применяется во многих отраслях науки и техники и в наше время. Французский инженер-гидравлик Антуан Шези (1718–1798) вывел формулу скорости воды в открытых каналах и руслах рек, известную как «формула Шези». Химическую формулу воды практически одновременно открыли три выдающихся химика — британский физик и химик Генри Кавендиш (1731–1810), французский естествоиспытатель и основатель современной химии Антуан Лоран Лавуазье (1743–1794) и британский естествоиспытатель Джозеф Пристли (1733–1804).

Итальянский ученый-гидравлик Джованни Баттиста Вентури (1746–1822) разработал трубчатый вакуумметр, который в 1888 г. американский инженер-гидротехник Клеменс Гершель (1842–1930) использовал в США в устройстве «конфузор-диффузор» для измерения расхода воды при напорном движении. Это устройство широко известно в наши дни как «водомер Вентури». В 1796 г. французский изобретатель Жозеф-Мишель Монгольфье<sup>14</sup> (1740–1810) создал гидравлический таран, который использовался для подъема воды. Процессы, происходящие в этом устройстве, были объяснены по прошествии многих лет после опубликования работ Н. Е. Жуковского, посвященных теории гидравлического удара.

<sup>14</sup> Братья Жозеф-Мишель и Жак-Этьен Монгольфье изобрели воздушный шар и 14 декабря 1782 г. совершили на нем свой первый испытательный полет.

Вслед за открытиями ученых продвигалось по пути прогресса и устройство систем водоснабжения. Очень многие ученые и инженеры, начиная с середины XVII в., конструировали, изобретали и совершенствовали самые разные типы паровых насосов и машин. Это французский изобретатель Дени Папен (1647–1713), англичанин Томас Севери (1650–1715), английский механик Томас Ньюкомен (1663–1729), венгерский инженер Йозеф Карол Хелл (1713–1789) и др. Благодаря их изобретательскому таланту в XVIII в. уже были хорошо известны различные инженерные решения в конструировании насосов и других механизмов. Но технический прорыв в усовершенствовании парового двигателя совершил шотландский инженер Джеймс Уатт. В 1763 г. его попросили починить действующий макет паровой машины Ньюкомена, которая была создана в 1712 г. и полвека использовалась для откачки воды в шахтах и на судоремонтных верфях. Конструкция машины была громоздкой, требовалось много угля для ее работы, а управление ею осуществлялось вручную. Для этого нанимали специального человека, который с определенной периодичностью открывал и закрывал клапаны. В процессе работы над макетом Уатт понял, что цилиндр конструкции необходимо держать постоянно нагретым, что сильно сократило бы расход топлива. И он сделал так, что цилиндр постоянно оставался горячим. Для этого пар до конденсации отводился в отдельный резервуар через трубопровод с клапаном. Благодаря применению теплоизоляционного материала конденсатор оставался холодным. Таким образом, пароатмосферная машина превратилась в паровую. Патент на свое изобретение — «создание парового двигателя, в котором температура двигателя всегда будет равна температуре пара, несмотря на то что пар будет охлаждаться до температуры ниже ста градусов» — Джеймс Уатт получил в 1769 г. Однако паровую машину новой конструкции он создал только спустя семь лет.

Трудно сказать, как сложилась бы судьба изобретения Уатта, если бы подобное происходило в какой-либо другой стране. Но именно в Англии общество в то время оказалось наиболее подготовленным к использованию технических новшеств благодаря развитым рыночным отношениям, достаточным финансовым ресурсам и появившемуся активному предпринимательскому классу. Богатый промышленник Мэттью Болтон (1728–1809) оказал Джеймсу Уатту финансовую поддержку и принял самое деятельное участие в судьбе его изобретения. В 1781 г. Джеймс Уатт получил патент на паровую машину «для осуществления движения вокруг оси с целью приведения в действие других машин», то есть она могла использоваться не только в качестве насоса, как изобретение Ньюкомена. Чтобы продвинуть на рынке свою паровую машину, он рассчитал, какой груз в среднем в минуту поднимает обычная лошадь, приводя в действие водяной насос. Эту единицу мощности он обозначил как лошадиную силу. Таким образом, Уатт наглядно показал, во сколько раз паровая машина эффективнее лошади<sup>15</sup> способна крутить колеса мельниц, приводить в движение различные механизмы. В 1784 г.

<sup>15</sup> В 1882 г. Британская ассоциация инженеров решила присвоить его фамилию — Ватт — единице мощности. Это был первый в истории техники случай присвоения единице измерения имени собственного.



изобретатель модернизировал свою машину, назвав ее «универсальной». Она появилась на фабриках и заводах, с ее помощью приводили в движение прядильные и ткацкие станки и другие механизмы. А в начале XIX в. двигатели системы Уатта установили на первые паровоз и пароход.

Появление парового двигателя в корне изменило жизнь и быт человека, а родоначальников изобретения благодарные потомки увековечили в бронзе (рис. 7).



Рис. 7. Позолоченная бронзовая статуя Мэттью Болтона, Джеймса Уатта и Уильяма Мёрдока на Брод-стрит в Бирмингеме (авторы композиции — Уильям Блоей и Рэймонд Форбс-Кингс)

Стремительный рост городов по всему миру, вызванный промышленной революцией<sup>16</sup>, заставил европейцев вспомнить о том, что ими было незаслуженно отодвинуто на задний план, — о раннем опыте устройства водоотводящих систем в древних культурах Египта, Вавилона, Сирии, Греции, Рима. Неслучайно ученые называют XIX столетие временем канализационного ренессанса. В Европе возобновляется строительство централизованных систем канализации: в Гамбурге (1843 г.), Париже (1857 г.), Цюрихе (1860 г.), Франкфурте-на-Майне (1867 г.), Данциге (1870 г.), Берлине (1873 г.).

В период индустриализации в Германской империи отдельную канализацию, в которую направлялись хозяйственно-бытовые стоки, с разной степенью охвата городских территорий имели 80 городов. Еще в 50 — существовали общесплавная и отдельная канализации в разных районах одного города.

<sup>16</sup> Пупырев Е. И. Вода и власть. — М. : Экспо-Медиа-Пресс, 2014.

Сети водостока были построены в более чем 400 городах и поселениях. Со второй половины XIX в. системы канализации появляются в США, где ранее существовала практика устройства комбинированной (общесплавной) канализации, когда ливневые, производственные или хозяйственно-бытовые стоки не разделялись и не очищались. Считалось, что комбинированные канализационные системы дешевле построить, чем отдельные. В середине XIX в. начинается строительство грандиозная система канализации в Лондоне.

Огромные объемы грязной сточной воды сбрасывались в реки и другие водоемы без всякой очистки. Это приводило к их сильному загрязнению, а порой и превращению в сточные канавы там, где реки из-за маловодности не обеспечивали необходимого разбавления сточных вод. Эта проблема была почти повсеместной, в связи с чем в Англии, например, в 1861 г. был издан закон об очистке и освобождении сточных вод от фекальных масс и гниющих веществ перед выпуском в реки. Английская речная комиссия впервые разработала научные основания для очистки сточных вод. В Германии в 1865 г. после издания аналогичного закона была учреждена комиссия, которая в 1878 г. выдвинула два метода очистки сточных вод — поля орошения и механическую очистку.

Поля орошения представляли собой специально оборудованные и спланированные площадки, которые одновременно использовались для фильтрации сточных вод через почву и выращивания в ней сельскохозяйственных культур. Дрены (водотоки) укладывались на глубину до 1,5 м на расстоянии 4–6 м друг от друга с уклоном 0,20–0,25 %. Поступавшие в них сточные воды при фильтрации очищались за счет жизнедеятельности аэробных микроорганизмов, находившихся в верхнем слое почвы. В качестве питания эти микроорганизмы потребляли органические вещества загрязнений и тем самым удаляли их из сточных вод. На полях орошения помимо естественной очистки сточных вод методом фильтрации выращивались кормовые растения и овощные культуры: почвенные микроорганизмы обезвреживали патогенную микрофлору, а органические соединения являлись ценным удобрением для получения стабильных высоких урожаев.

Такие сплавные системы водоотведения были созданы в Гамбурге, Париже, Цюрихе, Франкфурте-на-Майне и Данциге. Нередко с увеличением притока воды из городов поля орошения заиливались, и тогда строили поля фильтрации, производительность которых была значительно выше. Если на полях орошения очищенная сточная вода использовалась для выращивания растений, то на полях фильтрации после впитывания сточной жидкости поверхность «карты» перепаживали и заполняли новой порцией сточных вод, а очищенная вода по дренам подавалась в коллектор и далее сбрасывалась в реку.

Поля орошения внедрялись и активно эксплуатировались в Париже, Берлине, Брауншвейге, Данциге, Бреславле (ныне Вроцлав), Оксфорде, Вулвергемптоне, Ноттингеме и Хитчине.

В XIX в. ученые разрабатывали и другие методы очистки сточных вод. Так, в 1846 г. в Англии был получен первый патент на химическое очищение сточных вод с применением извести и хлорирования сточной воды газобразным хлором. Такой метод использовался в Лейчестере (1860 г.), затем (в 1870-х гг.) — в Ковентри, Лидсе и Тоттенхэме, позднее (в 1890-х гг.) — в Лондоне, Бирмингеме, Актоне и др. Для первичного отстаивания на разных

станциях применялись как реагентные, так и безреагентные схемы. В 1890 г. первую установку с использованием химического осаждения осадка построили в Вустере (штат Массачусетс, США). В конце XIX в. для устранения неприятных запахов в разлагающиеся сточные воды при их очистке вводили кислород. Это послужило началом биологических аэробных и анаэробных обработок, которые позже стали основополагающими для процессов очистки сточных вод.

Одновременно с поиском и использованием самых разных способов очистки сточных вод строились протяженные трубопроводные системы, канализационные сети. Создание такой общегородской канализации в Лондоне стало особенно актуальным после эпидемий холеры в 1831 и 1849 гг. Не меньшим бедствием для города было и то обстоятельство, что во время прилива уровень улиц находился примерно на 9 м ниже уровня воды в реке Темзе. В 1858 г. при подъеме воды в Темзе в городе разразилась «великая вонь», которая вынуждала жителей центральной части города спасаться бегством.

Английский инженер французского происхождения Марк Брюнель (1769–1849) и его сын предложили план дренаживания Лондона путем постройки дренажного туннеля под Темзой длиной 500 м по направлению к более низкому берегу реки. Для этого построили щит диаметром 7,26 м, позади которого двигались девять рабочих, с помощью лебедок и тележек вынимавших грунт на поверхность. Туннель проходил под руслом реки с уклоном от начальной глубины 10,6 м до 36,8 м на противоположном берегу. Этот план был успешно претворен в жизнь, а сам туннель, по которому проложили железную дорогу, обустроили тротуарами и газовыми фонарями, стал модным местом<sup>17</sup> для прогулок не только у горожан — его тогда посетила даже королева Виктория.

При строительстве лондонской канализации были заложены инженерные решения, во многом определившие принципы последующего создания этих важных систем жизнедеятельности во всем мире. К примеру, в результате многочисленных исследований был сделан важный вывод о том, что большие сточные коллекторы должны иметь яйцеобразное сечение, а критический фактор, определявший нормальное движение стоков по трубам, — «гладкость» их внутренней поверхности. Именно глазированные изнутри глиняные трубы были признаны наилучшими по сравнению с другими материалами.

Эксперимент с помывкой улиц пожарным шлангом выявил, что струей воды под напором из шланга можно промывать водосточные отверстия. Проведенные расчеты показали: «смывная уборка» намного дешевле подметания улиц, вывоза слежавшегося навоза и других уличных отбросов. Данный опыт позволил инженерам выполнить гидравлические расчеты течения стоков для определения оптимального размера коллекторов. Так, был принят стандарт диаметра труб для ответвлений — 3 дюйма<sup>18</sup>, для промежуточных участков — 9 дюймов. Для главных коллекторов наиболее эффективным считали площадь поперечного

<sup>17</sup> В настоящее время этот туннель стал частью знаменитого лондонского метро — линия «Бейкерлоо».

<sup>18</sup> Дюйм (русское обозначение — дюйм; международное — inch, in или " (двойной штрих); от нидерл. *duim* — «большой палец») — неметрическая единица измерения расстояния и длины в некоторых системах мер. Сейчас под дюймом обычно подразумевают используемый в США английский дюйм (англ. inch), равный 2,54 см.

сечения, в 75 раз превышающую сечение концевых участков и в 8–13 раз — сечение промежуточных.

После того как лондонская Комиссия по стокам приняла концепцию использования воды в качестве среды, уносящей нечистоты, было решено проложить по всему городу большие сточные коллекторы яйцеобразного сечения, в которые входили бы индивидуальные сточные трубы от жилых и общественных зданий. В связи с этим английские инженеры разрабатывали сточную систему, которая могла бы отводить отходы жизнедеятельности 2 млн жителей из зоны их проживания. Специальная комиссия проводила эксперименты с «уборной типа ватерклозет и системой сточных труб». На рассмотрение поступали десятки проектов, но конструкция ватерклозетов все еще оставалась громоздкой. Примечательно, что в этой работе участвовал водопроводчик Томас Крэппер (1836–1910), который изобрел такую полезную вещь для туалета, как бачок для воды. Несмотря на то что патент на изобретенные ватерклозеты в Англии выдали еще в 1775 г., широкое использование этих устройств началось только в XIX в. — после того как в Лондоне к 1868 г. завершилось строительство канализационной системы, включающей в себя крупные подземные перехватывающие канализационные коллекторы.

На территории Лондона была применена комбинированная система канализации: полная раздельная и частично раздельная (прием части дождевого стока в бытовую сеть) — в периферийных районах и пригородах; общесплавная — на городской территории и в некоторых прилегающих районах. Таким образом, в Лондоне построили канализационную сеть общей протяженностью 850 км, по которой сточные воды направлялись за пределы города — к устью Темзы, а затем отводились в море. Но позднее коллекторы стали транспортировать воду на основные очистные станции города: Бектон (1864 г.), Кросснес (1865 г.) и Могден (1931–1936 гг.).

Как и в сфере водоснабжения, в Англии во второй половине XIX в. было заложено правовое регулирование в вопросах очистки сточных вод с целью снижения загрязнений водоемов и оздоровления санитарно-эпидемиологической обстановки в городах. Этот важный опыт получил дальнейшее развитие и в других странах мира.

### ***Водоотведение и санитарное благоустройство***

На протяжении всего XVII в. водостоки представляли собой отдельные открытые каналы большого сечения, а также большие кирпичные и каменные каналы, по которым в ближайшие овраги и русла рек отводились хозяйственные, промышленные и атмосферные воды. Обычным способом удаления нечистот были отхожие места, которые устраивались при домах, так же это было и в Измайловском дворце. Для вывоза нечистот существовали особые телеги.

В расходных книгах Московского Кремля и многих монастырей того времени имеются записи о том, что для отведения сточных вод прокладывали сточные трубы, применяя камень для отделки сводов. Сточные воды спускались по открытым каналам. В Московском Кремле канализацией были оснащены

Сытный, Жилой и другие дворцы, «мыленки» (бани) и здания, где был большой расход воды. Каналы, по которым отводились воды, постоянно чистили.

Многое стало меняться в вопросах отведения сточных вод и санитарного благоустройства в XVIII в. В 1683 г. Стрелецкому приказу, который выполнял полицейские функции и занимался противопожарной охраной в городах, поручили следить за порядком в Москве. С переименованием Стрелецкого приказа в Приказ земских дел с 1701 г. в России устанавливается постоянный надзор за постройкой каменных зданий и исправностью мостовых. Создание Петром I полицейских учреждений ознаменовало начало контроля государства за чистотой улиц, рек и каналов, а также принятия мер против распространения эпидемических заболеваний.

Моштение улиц и мостовых камнем, начавшееся в 1692 г., положительно сказалось на санитарном благоустройстве городов и, в частности, на водоотведении поверхностных сточных вод. В 1705 г., когда в Петербурге стали сооружать булыжные мостовые, крестьяне облагались натуральной повинностью по доставке камня и песка для этих работ. В Московском Кремле деревянные мостовые были заменены каменными в 1725 г., в Киеве улицы вымостили к 1739 г.

Начиная с Петровского указа 1699 г. о том, чтобы не засоряли реки нечистотами, в XVIII в. выходят и другие распоряжения: о поддержании чистоты на улицах и чистке навоза со дворов (1737 г.), о запрете засорять дно рек и каналов сплавляемым по ним лесом с неочищенной корой (1750 г.). Несмотря на принимаемые меры, санитарное состояние городов, как и поверхностных водоемов, оставляло желать лучшего. Но то, что в XVIII в. Петром I были заложены основы санитарного благоустройства русских городов, свидетельствовало о серьезном отношении государства к устройству в них систем водоотведения<sup>19</sup>.

### Водоотведение как индустрия. Технологический рывок

Промышленная революция в Европе, широкое распространение паровой машины Уатта как универсального двигателя, победа буржуазной революции во Франции — все эти события повлияли на экономическое и политическое развитие России, в которой тоже зарождается промышленный капитализм и постепенно разрушается крепостной строй (1770–1860 гг.).

В XIX в. в России капитализм находился в зачаточном состоянии. В 1825 г. в Москве для отведения атмосферных вод от близко расположенных отдельных зданий были сооружены крупные Самотечный и Неглинный каналы. В 1829 г. началось строительство канализации в городе Старая Русса, затем — в Царском Селе (1880 г.), Гатчине (1882 г.), Ростове-на-Дону (1893 г.), Москве (1898 г.), Саратове (1910 г.). Перед Первой мировой войны системы канализации были построены в Харькове, Севастополе, Самаре, Перми, Нижнем Новгороде и Царицыне.

Особый опыт устройства водосточных систем был у Петербурга. В 1832 г. длина подземных водостоков здесь достигала более 95 км. В это время широко

<sup>19</sup> Воронов Ю. В., Пугачев Е. А. История отрасли и введение в специальность «Водоснабжение и водоотведение»: учебник. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2012.

применялись деревянные трубы, сделанные из пиленых продольных бревен, которые легче было чистить от грязи, песка и земли, смываемых с мостовых. Каналы были больших размеров — сечением  $53 \times 53$  см и  $1,4 \times 1,4$  м. Так как сточные воды по ним отводились в Неву, Фонтанку и другие речки, то все они быстро загрязнялись. Поэтому перед выпуском стоки проходили через грубые фильтры, состоявшие из трех отделений: после песколовки они попадали в отделение с булыжником, затем через два нижних отверстия поступали в третье отделение, поднимались через толщу булыжника и выпускались в реку.

В Петербурге на Обводном канале строились кирпичные водостоки и смотровые колодцы. Громадный водосток (высотой 3,78 м и шириной 3,60 м)<sup>20</sup> проложили под Конногвардейским бульваром взамен имевшегося там Адмиралтейского канала. Глубина укладки водосточных труб была разной и варьировалась от 2,8 до 4,2 м. Водосточная сеть в Петербурге, создававшаяся с XVIII до середины XIX в., представляла собой развитую систему канализации с домовыми и дворовыми устройствами, протяженной уличной сетью, колодцами и грубыми фильтрами. Отводились как поверхностные, так и хозяйственно-бытовые воды.

Иной позиции придерживались в Москве: в 1886 г. инженер В. Д. Кастальский обнародовал свой доклад о целесообразности для Москвы отдельной системы водоотведения. По его мнению, производственно-бытовые (без атмосферных) стоки должны были отводиться с дальнейшей их очисткой на полях орошения. Это предложение имело свое преимущество: отдельная система канализации требовала в два-три раза меньше площади для устройства полей орошения по сравнению с общесплавной канализацией, а также гораздо меньше затрат на эксплуатацию. В 1890 г. Кастальский разработал проект первой очереди московской канализации, обслуживающей 1,5 млн жителей, с удельной нормой водоотведения 85 л/чел. в сутки на расход 84 тыс. м<sup>3</sup>/сут бытовых и 72 тыс. м<sup>3</sup>/сут фабричных вод с очисткой бытовых вод в объеме примерно 25%. В 1893 г. начались работы по прокладке сетей. Средства для покрытия расходов предоставлялись через проведение облигационных займов, рассчитанных на погашение в течение 49 лет. В этой подготовительной работе самое активное участие принимал городской голова Москвы Николай Александрович Алексеев (1852–1893). На собственные деньги он лично ездил с молодыми инженерами в Ригу и Варшаву, тщательно изучал опыт создания канализации, после чего вынес вердикт: «Составить проект и делать немедленно».

Канализационную сеть проложили только в границах Садовых улиц<sup>21</sup>. Первая канализационная насосная станция в Москве (рис. 8) заработала в 1898 г. Это событие стало настоящим прорывом как в санитарном, так и в техническом отношении. Станция перекачивала сточные воды на поля орошения (рис. 9), где они очищались (Люблинские и Люберецкие поля орошения с 1914 г. были преобразованы в поля фильтрации)<sup>22</sup>.

<sup>20</sup> Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге.

<sup>21</sup> Канализация Москвы: десять лет в новом веке. — М.: Современная полиграфия, 2008.

<sup>22</sup> Поля орошения и поля фильтрации относятся к естественным способам очистки сточных вод. Основное преимущество естественных способов очистки — в невысокой стоимости строительства и эксплуатации таких сооружений, недостаток — низкая скорость процессов очистки по сравнению с искусственными сооружениями.



Рис. 8. Здание главной насосной канализационной станции в Москве



Рис. 9. Люберецкие поля орошения

Огромный научный вклад в устройство и эксплуатацию этих полей внесли профессор Сельскохозяйственного института В. Р. Вильямс, инженеры Н. М. Логачев и М. И. Биман. В 1893 г. Городская управа Москвы предложила им посетить города Западной Европы с целью изучения опыта устройства полей орошения и систем канализации. Ученые ознакомились с работой систем

канализации Берлина, Парижа, Данцига, Оксфорда, Лондона, Брауншвейга, Ноттингема, Кенигсберга и других городов. В. Р. Вильямс подробно изложил материалы этой поездки в своих научных трудах. Таким образом, накопление знаний, обмен информацией и изучение мирового опыта способствовали формированию отечественной инженерно-технологической школы.

С ростом промышленности подавляющее большинство фабрик и заводов не имело возможности подключаться к общей системе канализации. Именно поэтому возник вопрос о строительстве II очереди системы канализации (рис. 10), предполагавшей создание двух систем канализования города: первая — Верхняя зона города, Верхний канал, Люблинский загородный водовод и поля орошения; вторая — Нижняя зона города, Нижний канал, главная насосная станция, Люберецкий загородный водовод и поля орошения.



Рис. 10. Строительство канализационного коллектора в окрестностях Москвы

Строительство II очереди системы канализации велось в 1908–1917 гг. В 1914 г. был построен Люберецкий загородный канал общей протяженностью 17,9 км. Это позволило задействовать Люберецкие поля фильтрации — территории, специально устроенные и предназначенные для биологической очистки сточных вод и их дальнейшего отвода в грунт.

В период бурного промышленного подъема в крупных индустриальных городах в первую очередь строились системы водоснабжения, а создание канализации шло с опозданием. Вопрос о необходимости отведения сточных вод был поднят специалистами на II Всероссийском водопроводном съезде в 1895 г. в Варшаве, где на тот момент уже существовала система городской канализации. С этого времени вопросы водоотведения стали рассматриваться на всероссийских водопроводных съездах регулярно, а на X съезде (1911 г.) было принято положение, которое внесло изменение в само название — все последующие были уже всероссийскими водопроводными и санитарно-техническими съездами.



На XI съезде (1913 г.) делегаты приняли программу по канализации, включающую в себя отдельные разделы: устройство домовой канализации; общая система канализации; прокладка и содержание канализационных сетей (методы расчета, производства работ, вентиляционная сеть); подъем и доставка сточных вод (насосы, двигатели, компрессоры, водоводы и другие сооружения); отделение крупных взвешенных веществ из сточных вод, осветление сточных вод (осадочные резервуары, септики и прочие сооружения, удаление и обезвреживание осадка); внедрение биологического способа очистки сточных вод (поля орошения, поля фильтрации, искусственные окислители); кипячение и дезинфекция сточных вод; очистка и обезвреживание сточных вод промышленных предприятий; санитарно-технический контроль за очисткой сточных вод; отчетность по эксплуатации канализации; способы удаления, обезвреживания и утилизации твердых отходов.

В Санкт-Петербурге протяженность канализационных магистралей в 1917 г. составляла<sup>23</sup> 486 км, в том числе из деревянных труб — 356 км, из бетонных — 130 км. Однако строительство канализационной системы началось только в 1925 г. Вопросы, связанные с разработкой проекта, откладывались из-за сложных гидрологических особенностей города<sup>24</sup> и наводнений<sup>25</sup>.

Вопрос о необходимости строительства канализации в Нижнем Новгороде ставился еще в 1879 г., во время строительства второго водопровода, когда из-за увеличения подачи воды население сливало нечистоты в ближайшие овраги, канавы или просто на улицу. Реки и водоемы напоминали зловонные ямы. В 1904 г. был утвержден проект канализации, однако война с Японией отодвинула сроки работ до 1914 г.<sup>26</sup> Канализационную сеть в Перми построили

<sup>23</sup> Айсаев А. А., Алексеев М. И. Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга. — СПб. : Новый журнал, 2002.

<sup>24</sup> Значительная часть Санкт-Петербурга в современных его границах расположена в пределах дельты реки Невы и прилегающей к ней Приневской низменности. Грунтовые воды залегают на глубине 1–3 м. Верхние слои грунтов города — в основном водонасыщенные пылеватые супеси и тонкозернистые пески, т. е. грунты пльвинного характера. Современные канализационные туннели расположены на глубинах до 90 м. Для строительства туннелей применяются современные горнопроходческие щиты.

<sup>25</sup> Значительная часть территории Санкт-Петербурга расположена на высоте над уровнем моря, не превышающей 1,2–3,0 м. Эти площади до строительства защитных сооружений были подвержены опасности наводнения. Водный режим в Неве сильно зарегулирован. В верхней части течения реки отражает особенности водного режима Ладожского озера, а в нижней — Финского залива и в целом Балтийского моря. Особенно опасное и частое воздействие на состояние Невы оказывает Балтийское море, вызывая наводнения. Во все времена существования города стояла проблема изучения причин наводнений и защиты от них. История Петербурга насчитывает более 200 опасных наводнений (с подъемом воды на 151–200 см выше ординара) и более 60 особо опасных (с подъемом воды на 201–289 см). Трижды город подвергался катастрофическим наводнениям с подъемом воды на 290 см выше ординара.

<sup>26</sup> За два года были проложены: Береговой и Ковалихинский коллекторы, 35 км уличной сети, а также построены две насосные станции, грабельная камера в районе Сенной площади, четыре эмшерских колодца (эмшер — резервуар для отстаивания (осветления) сточных вод и одновременно для сбраживания выпавшего осадка в анаэробных условиях), иловые площадки, песколовки, выпуск в реку Волгу.

в 1915–1917 гг. Для изготовления бетонных колодцев здесь на заимке возвели специальный завод.

Октябрьская революция, а вслед за ней и Гражданская война отодвинули воплощение многих намеченных планов. Строительство канализационных сетей в городах России возобновилось лишь в 1923–1924 гг. Это время стало новой точкой отсчета в истории водоотведения России, ознаменовав начало советского периода. Технологии водоотведения, а впоследствии и очистки сточных вод прошли долгий путь как в мире, так и в России. Расположив основные вехи развития технологий на оси времени, это можно назвать эволюцией водоотведения. С ростом и развитием городов отведение сточных вод стало необходимостью, при этом эволюция технологий водоотведения шла медленнее по сравнению с водоснабжением и была продиктована не только ростом объема промышленного производства, но и санитарными требованиями, а также более комфортным обустройством жизни населения городов и поселений.

С 1914 по 1917 г. страна пережила Первую мировую войну и Октябрьскую революцию, закончившуюся развалом Российской империи и образованием нового государства — Российской Советской Федеративной Социалистической Республики (РСФСР). Это привело к тому, что системы водоснабжения, водоотведения, санитарной очистки были где-то частично, а где-то и полностью разрушены.

В 1922 г. на XII Всероссийском водопроводном съезде профессор П. С. Белов доложил о развитии канализации в городах, число которых насчитывалось около полутора десятков, охват владений канализацией в них составлял примерно 25 % от числа владений, имевших водопровод. К 1926 г. в СССР системы канализации были построены только в 12 крупных городах: Одессе, Ростове-на-Дону, Киеве, Москве, Харькове, Самаре, Саратове, Екатеринославе<sup>27</sup>, Перми, Сталинграде, Севастополе и Нижнем Новгороде. Канализованными были и некоторые небольшие города и населенные пункты: Троицк, Ялта, Детское Село<sup>28</sup>. Строительство канализации было также начато в Астрахани (1915 г.), Симферополе, Баку, Полтаве и Железноводске (1924–1925 гг.).

Некоторые города имели разработанные проекты, но не приступали к постройке канализации из-за нехватки средств: Оренбург, Тифлис<sup>29</sup>, Казань, Воронеж, Николаев, Кострома и др. Кроме того, планировалось приступить к канализованию Минска и городов-курортов Кавказских Минеральных Вод — Кисловодска, Пятигорска, Ессентуков.

Очистка сточных вод в СССР на тот момент не имела приоритетного значения. В Ялте и Севастополе, например, сточные воды отводились в море без очистки, в Киеве и Ростове-на-Дону — в реки Днепр и Дон. В Самаре, Саратове, Екатеринославе и Перми сточные воды после механической очистки<sup>30</sup>

<sup>27</sup> Екатеринослав — сейчас город Днепр. С 1802 по 1926 г. — Екатеринослав, а с 1926 по 2016 г. — Днепропетровск.

<sup>28</sup> Детское Село (1918–1937 гг.) — до 1918 г. Царское Село, с 1937 г. — город Пушкин.

<sup>29</sup> Тифлис — с 1936 г. город Тбилиси.

<sup>30</sup> Механическая очистка сточных вод применяется для удаления нерастворимых минеральных и органических примесей путем их фильтрации или осаждения.

сбрасывались в Волгу, Днепр и Каму. В Одессе, Москве и Киеве для очистки части сточных вод применялись поля орошения, в Харькове осуществлялась биологическая очистка<sup>31</sup> всех сточных вод с использованием биофильтров.

В СССР опытами и научными исследованиями по очистке сточных вод занимались Институт экспериментальной медицины (С. К. Дзержговский) и опытная станция на Московских полях орошения (инженер М. И. Биман). Кроме того, в целях наилучшего выбора способа очистки сточных вод была построена опытная станция и в городе Екатеринославе.

Советские и российские ученые внесли огромный вклад в развитие канализации и создание отечественной инженерно-технологической школы. В области очистки сточных вод научные исследования и практическая работа проводились плеядой таких ярких ученых, как В. Р. Вильямс (1863–1939), один из основоположников современной агробиологии, московский инженер М. И. Биман, К. Н. Корольков (1891–1947), А. И. Жуков (1899–1980), С. М. Шифрин (1899–1980), Л. А. Кульский (1903–1993), С. И. Быков (1908–1996), И. Э. Апельцин (1911–1991), Л. А. Алферова (1915–2001), С. В. Яковлев (1914–2005), Н. А. Лукиных (1918–2008), В. И. Калицун (1926–1998) и др.

Малая водность Москвы-реки и постепенное развитие канализационного хозяйства столицы требовали поиска и внедрения новых приемов очистки сточной воды и обработки осадка<sup>32</sup>, поэтому первые станции полной биологической очистки строились именно в Москве и ее окрестностях. Этому способствовало принятое пленумом Московского городского совета в 1923 г. решение о разработке проекта канализования Москвы и его практическом осуществлении. В основу строительства III очереди объектов водоотведения был заложен новый принцип канализования, согласно которому в разных районах города предстояло возвести несколько станций интенсивной очистки сточных вод, оснащенных системой искусственной биологической очистки<sup>33</sup>. По этой децентрализованной схеме были построены и введены в эксплуатацию Кожуховская (1929 г.), Закрестовская (1936 г.), Филевская и Тушинская (1937 г.) станции аэрофльтрации, в 1938 г. — первая очередь Люблинской станции аэрации<sup>34</sup> (в то время одна из крупных в Европе), в 1940 г. — Кунцевская, а с начала 1940-х гг. началась эксплуатация крупнейших Курьяновской и Люберецкой станций аэрации.

Особое внимание ученых и специалистов было приковано к работе Кожуховской станции аэрофльтрации (рис. 11), где были внедрены совершенно новые по своим принципам и конструкциям устройства и методы очистки городских сточных вод.

<sup>31</sup> Биологическая очистка сточных вод основана на способности микроорганизмов использовать содержащиеся в сточных водах различные органические и неорганические соединения в качестве источника питательных веществ.

<sup>32</sup> Храменков С. В. и др. 100 лет канализации Москвы. — М. : Прима-Пресс, 1998.

<sup>33</sup> В искусственных очистных сооружениях процессы биологической очистки сточных вод происходят более интенсивно. Это позволяет за короткое время очищать большие объемы воды.

<sup>34</sup> Сооружения новой станции были возведены на месте бывших полей орошения, принимавших стоки в начале века.



Рис. 11. Кожуховская станция аэрофильтрации

Технологическая схема станции включала в себя аэротенки<sup>35</sup>, коагуляторы<sup>36</sup> с 15-минутной аэрацией без регенерации активного ила, отстойники<sup>37</sup> для отделения активного ила, аэрофильтры<sup>38</sup> и пруд-отстойник (третья ступень очистки после аэрофильтров). В 1934 г. на станции были введены в эксплуатацию головные сооружения второй секции — вертикальные первичные отстойники<sup>39</sup>

<sup>35</sup> Аэротенк — резервуар, служащий для биохимической очистки сточных вод. Принцип его функционирования основан на жизнедеятельности микроорганизмов, которые разлагают или используют загрязняющие соединения в качестве пищи. Микроорганизмы в аэротенках находятся в свободном состоянии. В зависимости от требуемой степени снижения органического загрязнения сточных вод аэротенки проектируются на полную и неполную биологическую очистку.

<sup>36</sup> Коагулятор — сооружение, в котором происходит коагулирование воды (процесс осветления и обесцвечивания воды с применением химических реактивов-коагулянтов, образующих осадок при взаимодействии с гидрозолями и растворимыми примесями воды).

<sup>37</sup> Отстойник — блок механической очистки, предназначенный для гравитационного отстаивания мелкодисперсных загрязнений, в основном органических, и, как следствие, снижения уровня загрязнения воды органическими веществами.

<sup>38</sup> Аэрофильтр — резервуар, служащий для биохимической очистки сточных вод. Очистка сточных вод в аэрофильтрах происходит под воздействием микроорганизмов, заселяющих поверхность загрузки и образующих биологическую пленку. При контакте сточной воды с этой пленкой микроорганизмы окисляют органические загрязнения, в результате чего сточная вода очищается. Воздух в аэрофильтры подается вентиляторами. Микроорганизмы в аэрофильтрах находятся в иммобилизованном (прикрепленном) состоянии.

<sup>39</sup> Вертикальный отстойник — сооружение, обычно из железобетона, в котором вода движется вертикально снизу вверх. Вертикальные отстойники представляют собой цилиндрические или квадратные в плане резервуары с коническим дном. Сточная вода подводится к центральной трубе и подается в отстойник в его нижней части. Применяется при небольших объемах исходной воды.

и метантенки<sup>40</sup>, положено начало хлорированию очищенной воды (вода смешивалась с хлором в смесителях и поступала в отстойный пруд). В 1935 г. было внедрено сжигание отбросов (для этого в котельной метантенков была приспособлена дутьевая угольная топка резервного котла). Перед сжиганием отбросы прессовались на ручном прессе, что позволяло снизить влажность с 85 до 74%. В процессе сжигания использовался газ метантенков. В 1938 г. в эксплуатацию была введена песколовка<sup>41</sup>. С 1942 г. на станции удаление песка производилось гидроэлеватором (ранее — эрлифтом).

Аэрофильтры, или «биофильтры с повышенной нагрузкой», как их называли впоследствии, представляли огромный интерес не только для отечественных, но и для зарубежных специалистов. Аэрофильтры — это биофильтры с механическим нагнетанием воздуха, что в то время было принципиально новым решением. Через них пропускаться нагнетаемый воздуходувками<sup>42</sup> или компрессорами воздух, и очистка сточных вод от органических соединений ускорялась в разы, повышая ее эффективность. Это было экономично и выгодно. Так, эксплуатация аэротенков с частичной очисткой обходилась в 2,5 раза дороже эксплуатации аэрофильтров, для которых требовалось в 24 раза меньше электроэнергии, чем для аэротенков.

Еще одним направлением развития биологической очистки в рассматриваемый период, внедренным на Кожуховской станции, была технология мезофильного сбраживания осадка с использованием получаемого в результате метаногенного сбраживания биогаза для технологических нужд и отопления. В этом направлении была проведена целая серия работ.

Впервые в России было испытано оборудование для механического обезвоживания осадка: центрифуги<sup>43</sup>, вакуум-фильтры<sup>44</sup> и ленточный фильтрующий стуститель<sup>45</sup>. Интересно отметить тот факт, что в эти годы ученым Н. М. Поповой были проведены опередившие время исследования по пиролизу осадка сточных вод<sup>46</sup>. Этот метод до сих пор рассматривается в мировой практике как один

<sup>40</sup> Метантенк — сооружение, обычно из железобетона, используемое для биологической переработки (сбраживания) с помощью бактерий и других микроорганизмов в анаэробных условиях (без доступа воздуха) органической части осадка сточных вод и других органических отходов, в результате которой выделяется биогаз.

<sup>41</sup> Песколовка — сооружение для механической очистки сточных вод, служит для выделения мелких тяжелых минеральных частиц (песок, шлак, бой стекла и т. п.) путем осаждения.

<sup>42</sup> Воздуходувка — машина для сжатия и подачи воздуха.

<sup>43</sup> Центрифуга — установка горизонтального или вертикального типа для обезвоживания или сгущения различных типов осадков сточных вод. Центрифуга включает в себя: конический ротор (который имеет сплошные стенки), полый шнек, трубопровод для подачи обрабатываемого осадка, два бункера (в которые выгружаются фугат и кек).

<sup>44</sup> Вакуум-фильтр — агрегат непрерывного действия для разделения под давлением жидких неоднородных систем (осадок сточных вод) на твердую (обезвоженный осадок сточных вод) и жидкую (фильтрат) фракции.

<sup>45</sup> Ленточный стуститель осадка предназначен для механического обезвоживания осадков сточных вод.

<sup>46</sup> Способ утилизации осадков сточных вод по технологии пиролиза заключается в их необратимом химическом изменении под действием повышенной температуры без доступа или с ограниченным доступом кислорода с выделением горючего пиролизного газа. Преимущество пиролиза по сравнению с непосредственным сжиганием отходов заключается, прежде всего, в предотвращении загрязнения окружающей среды с получением полезных продуктов: пиролизного газа, содержащего монооксид углерода и водород, и твердого инертного остатка.

из очень перспективных, хотя и не нашел массового применения для термической переработки осадков сточных вод.

Научная работа по изучению процессов интенсивной очистки сточных вод в искусственных условиях, выполненная коллективом ученых и инженерно-техническим персоналом на очистных сооружениях в городском районе Кожухова под руководством профессора С. Н. Строганова (1881–1949), стала неоценимым вкладом в развитие будущих станций аэрации в нашей стране и за рубежом. С момента освоения кожуховских сооружений российская канализация уверенно пошла по пути строительства новых станций аэрации, внедрения и дальнейшего совершенствования технологии биологической очистки сточных вод. Кожуховская станция на десятилетия вперед стала образцом проектирования, строительства и эксплуатации станций аэрации в СССР.

В 1935–1936 гг. были введены в эксплуатацию две небольшие станции аэрации районного значения: Закрестовская и Филевская. Историческая роль этих станций заключалась в том, что это были первые станции, осуществлявшие полную биологическую очистку сточных вод.

Отличительной особенностью Люблинской станции аэрации производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут было внедрение новейших по тем временам методов очистки сточных вод и обработки осадков для такого объема сточных вод. Станция была оснащена сооружениями механической очистки (грабельное помещение<sup>47</sup>, три песколовки, четыре жироловки<sup>48</sup>, восемь вертикальных<sup>49</sup> и восемь радиальных первичных отстойников<sup>50</sup>, сбросной канал, хлораторное помещение и канал для отведения осветленной воды в Москву-реку) и биологической очистки (10 метантенков, котельная на пять котлов, иловые площадки (на 20 га)). С вводом в эксплуатацию Люблинской станции аэрации интенсивный метод очистки сточных вод стал преобладающим в общем балансе канализационных очистных сооружений Москвы.

<sup>47</sup> Грабельное отделение канализационно-насосной станции (КНС) предназначено для грубой очистки сточных вод от крупных предметов — веток, брусков, коробочек, бутылок, целлофановых пакетов и т. д. Фильтрующим элементом, которым оснащается подобное помещение, является специальная наклонная решетка, именуемая граблями.

<sup>48</sup> Жироловка — резервуар для очистки сточных вод от жиров и частично от взвешенных веществ, которые отличаются малой или значительной гидравлической крупностью.

<sup>49</sup> Вертикальный отстойник имеет преимущества по сравнению с горизонтальным; к их числу относятся удобство удаления осадка и меньшая площадь, занимаемая сооружением. Однако он имеет и ряд недостатков, из которых можно отметить: а) большую глубину, что повышает стоимость их строительства, особенно при наличии грунтовых вод; б) ограниченную пропускную способность, так как диаметр их не превышает 9 м.

<sup>50</sup> Радиальный отстойник — круглый в плане железобетонный резервуар, в который осветляемая вода подводится снизу в центр отстойника и движется радиально от центра к периферии. Скорость изменяется от максимума в центре до минимума на периферии. Выпавший осадок перемещается в иловый приямок скребками, расположенными на вращающейся ферме. Диаметр типовых радиальных отстойников составляет 18–50 м. Они используются на очистных станциях производительностью свыше 20 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Эффект осветления достигает 50–55%. К преимуществам радиальных отстойников относятся простота эксплуатации и низкая удельная материалоемкость, к недостаткам — уменьшение коэффициента объемного использования из-за высоких градиентов скорости в центральной части.

Необходимость строительства Курьяновской станции аэрации закреплялась Постановлением Совета Народных Комиссаров СССР № 1349 от 26.07.1936 г. в рамках Генеральной схемы расширения и реконструкции канализации Москвы. Проектирование новой станции производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут осуществлялось в 1936–1938 гг. В 1939 г. началось строительство станции, но было прервано Великой Отечественной войной.

Бурное развитие промышленности в Москве потребовало особого внимания к приему производственных сточных вод в городскую канализацию<sup>51</sup>. Генеральной схемой развития канализации было предусмотрено строительство на предприятиях локальных очистных сооружений. За 1936–1940 гг. к городской канализации было присоединено 172 промышленных предприятия.

Вторая половина 1930-х гг. ознаменовалась масштабным строительством объектов канализации — Юго-Западного, Хапиловского, Измайловского, Яузского каналов и крупных коллекторов. В 1939–1940 гг. были внедрены новые методы прочистки канализационной сети<sup>52</sup>. Перед Великой Отечественной войной в Москве к канализационной сети было присоединено только 40 % домовладений. Некоторые из окраинных районов были обеспечены канализацией на 10–20 %<sup>53</sup>.

В Санкт-Петербурге в 1925 г. городскими властями были утверждены основные планы канализования города (по отдельной схеме, с выделением четырех самостоятельных канализационных бассейнов). В качестве опытного района для создания новой системы канализации был выбран Васильевский остров. Строительство канализации здесь (с общей протяженностью уличной сети 153,3 км) продолжалось в течение 10 лет. К 1930 г. была построена Василеостровская канализационная насосная станция. Выпуск сточных вод (без очистки) производился в Невскую губу (восточную часть Финского залива). В результате проведенных работ существенно улучшилось благоустройство города, была ликвидирована заболоченность ряда окраин и созданы условия для строительства мостовых. В 1930-е гг. активно строились канализационные коллекторы в других районах города. Протяженность канализационной сети города достигла 1130 км, что превышало дореволюционный уровень более чем в два раза. В 1940 г. была принята новая Генеральная схема канализования Ленинграда, в основе которой также лежала отдельная система водоотведения.

В 1930 г. выполнен проект отдельной канализации Заречной части Нижнего Новгорода (рис. 12). Пропускная способность очистных сооружений к 1935 г.

<sup>51</sup> Храменков С. В. и др. 100 лет канализации Москвы.

<sup>52</sup> Стали применять резиновые мячи для прочистки крупного и овоидального сечений (овоид — замкнутая коробовая кривая, имеющая одну ось симметрии и состоящая из двух опорных окружностей разного диаметра), начали внедрять гидравлические способы прочистки вместо малопроизводительных механических.

<sup>53</sup> Из неканализационных домовладений нечистоты вывозились на сливные станции. Во время войны это стало невозможным из-за нехватки автотранспорта. Для решения вопроса был организован слив непосредственно в городские канализационные трубопроводы (минуя сливные станции).

была 5 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из 3000 домовладений Нагорной части города канализовано 900. В это время в городе практически не было ливневой канализации. На Нижне-Волжской набережной были проложены поперечные коллекторы со сбросом стоков в реку без очистки. К 1936 г. протяженность канализационной сети составляла 38 км и имела около 200 подключений.



Рис. 12. Строительство канализационной сети в Нижнем Новгороде

### ***Водоотведение в годы Великой Отечественной войны***

Особая страница в истории водоотведения XX столетия связана с Великой Отечественной войной. Несмотря на то что канализационные сети городов во время бомбежек и артобстрелов для вражеских сил были важной мишенью, системы водоотведения продолжали работать. Они были отнесены к стратегическим объектам, а их дирекция и инженерный персонал переведены на казарменное положение.

В годы войны ленинградская канализация сыграла большую роль в обеспечении своевременного отведения воды, затопивавшей улицы при разрушении бомбами водопроводных сетей. Бассейны ливневой канализации на Васильевском острове в Ленинграде использовались как пожарные резервуары.

В Москве с первых дней войны стали создаваться подразделения местной противовоздушной обороны, было законсервировано строительство канализационных объектов. Весь автотранспорт был мобилизован на военные нужды, в результате на каждом канализационном участке осталось по одной грузовой машине, которая использовалась только в исключительных случаях,



при ликвидации аварий и засоров в сети<sup>54</sup>. В 1942 г. Москва оказалась отрезанной от Донбасса, в связи с чем возникли перебои с топливом, что заставило изыскивать местные ресурсы. По предложению инженера М. И. Шишкина была организована заготовка топливных брикетов из осадка сточных вод на топливоформовочных машинах. В течение всего военного времени брикетирование позволило обеспечить топливом<sup>55</sup> хозяйство Люблинского комбината и Люберецких полей фильтрации. Во время войны было немало разрушений на сетях из-за взрывной волны или прямых попаданий фугасных бомб. Лютой зимой 1941–1942 гг. было много случаев замерзания городских и дворовых канализационных сетей.



Рис. 13. Люблинская станция аэрации

На Люблинской станции аэрации (рис. 13) в условиях военного времени было завершено строительство второй очереди — сооружений биологической очистки, которые были введены в эксплуатацию в 1945 г. В период с 1943 по 1945 г. также производились работы по наладке метантенков. В экстремальных условиях на Люблинском комбинате были проведены успешные эксперименты по использованию метана в качестве горючего для автотранспорта. В 1944 г. на основании полученных результатов конструкторским бюро Глававтогена был выполнен

<sup>54</sup> В теплое время для прочистки сети использовались тележки, зимой — сани. Особенно большие трудности возникали при перевозке лебедок. По предложению главного инженера 1-го канализационного района В. П. Днепрова была разработана лебедка, которую можно было оставлять в колодце. Для прочистки каналов и крупных коллекторов начал успешно применяться барабан, так называемый снаряд-цилиндр (1941 г.). В 1945 г. метод был усовершенствован — прочистка каналов стала осуществляться цилиндром со свободным тросом.

<sup>55</sup> В 1942 г. было заготовлено 5400 т брикетов из осадка, что эквивалентно 1 тыс. м<sup>3</sup> дров.

проект газонаполнительной станции, через год она была введена в эксплуатацию. В 1945 г. два автомобиля были переоборудованы для заправки газом метантенков (заправка осуществлялась на станции, и специально оборудованными газовозами газ развозился по Москве)<sup>56</sup>. После войны, в 1950 г., были выпущены первые газобаллонные автомобили промышленного производства.

На Люберецких и Люблинских полях фильтрации работало подсобное хозяйство, обеспечивавшее фронт овощами и мясомолочными продуктами. Объемы поставок были строго определены плановым заданием<sup>57</sup>. Основная часть продукции отправлялась на фронт, оставшаяся — предназначалась для работников полей фильтрации.

В годы Великой Отечественной войны в городе Куйбышеве (ныне город Самара) на Самарском склоне были построены Безымянские очистные сооружения производительностью до 60 тыс. м<sup>3</sup>/сут, использующие механическую очистку.

### *Период восстановления и интенсивного развития канализационного хозяйства*

После Великой Отечественной войны буквально с первых дней мирной жизни все силы в городах были брошены на восстановление и строительство водопроводных и канализационных сетей и объектов. В столице в 1947 г. были возобновлены работы по строительству Курьяновской станции аэрации. В декабре 1950 г. первые кубометры сточных вод поступили здесь на механическую очистку, а в 1952 г. заработали биологические сооружения. Масштабы сооружений и внедрение новых технологических решений в схему Курьяновской станции аэрации<sup>58</sup> потребовали разработки совершенно новых типов специального технологического оборудования, которое отечественная промышленность не выпускала. Впервые проектом предусматривались полная автоматизация работы станции и отдельных ее процессов, применение системы дистанционного контроля и управления с передачей показаний измерительных приборов в диспетчерский пункт.

Вместе с Курьяновской станцией аэрации Юго-Западный канал образовал так называемую Юго-Западную систему. С этого момента в московской канализации началось формирование мощных по масштабам канализационных систем, обеспечивавших подачу стоков на такие же мощные очистные сооружения, расположенные в юго-восточной части города.

В 1952 г. был утвержден проект строительства канализации в центральной части Ленинграда, которым предусматривалась не раздельная, а общесплавная схема канализования. Первая очередь канализации в центральной части города, с главной насосной станцией, была введена в эксплуатацию в 1958 г. В 1966 г.

---

<sup>56</sup> Пробег машин после заправки достигал 200 км. Спрос на газовое топливо возрастал из года в год.

<sup>57</sup> За 1941–1945 гг. подсобное хозяйство сдало государству 1430 центнера овощей, в том числе картофеля, и 23 центнера мяса.

<sup>58</sup> Храменков С. В. и др. 100 лет канализации Москвы.

утверждена Генеральная схема канализации Ленинграда, включающая в себя три крупных комплекса канализационных очистных сооружений. Первый из них — Центральная станция аэрации — был введен в 1978 г. (I очередь с мощностью очистных сооружений до 70 тыс. м<sup>3</sup>/сут), что позволило обеспечить очистку 27% сточных вод. До этого все канализационные стоки города сбрасывались в водоемы без очистки.

Развитие и совершенствование систем канализации в эти годы наблюдалось во многих крупных городах. Период 1950–1960 гг. можно в общем охарактеризовать как эпоху развития инженерно-технологической школы — от разработанной в 1930–1940 гг. и отшлифованной в 1950–1960 гг. технологии биологического окисления соединений углерода в аэротенках к доочистке. Под доочисткой в данном случае понимается глубокое удаление взвешенных веществ на зернистых фильтрах и обеззараживание очищенной воды.

В 1967 г. впервые в СССР на Зеленоградской станции очистки были введены в эксплуатацию сооружения доочистки<sup>59</sup> и дезинфекции<sup>60</sup> сточных вод. Такая технология очистки диктовалась тем, что река Сходня (приемник очищенных стоков) имела меженный расход всего 0,2–0,3 м<sup>3</sup>/с, а ниже по течению размещались форелевое хозяйство и зона отдыха. Поэтому классическая схема очистки была дополнена сооружениями доочистки в составе барабанных сеток с мелким фильтрующим полотном и песчаных фильтров с последующей дезинфекцией хлором. На Зеленоградскую станцию приезжали учиться со всего СССР, из стран Восточной и Западной Европы.

Также в 1967 г. Институтом «Гипрокоммунводоканал» был разработан проект канализации города Нижнего Новгорода, который предусматривал объединение канализационных очистных сооружений для всего города производительностью 1,2 млн м<sup>3</sup>/сут и две очереди строительства. До 1973 г. в Нижнем Новгороде сточные воды отводились без очистки в реки Оку и Волгу по 40 открытым выпускам. В 1968–1974 гг. была создана так называемая Большая канализация, включающая в себя строительство около 90 км канализационных коллекторов большого диаметра, в том числе два дюкерных подводных перехода через реку Оку, Ново-Мызенский туннельный коллектор глубокого заложения, ряд крупных насосных станций (главная насосная станция, большая автозаводская насосная станция и др.), а также первую очередь очистных сооружений на полную биологическую очистку производительностью 600 тыс. м<sup>3</sup>/сут (1974 г.).

До войны Сталинград<sup>61</sup> не имел законченной схемы канализации. В 1960 г. через 60 выпусков в Волгу без очистки сбрасывалось 190 тыс. м<sup>3</sup>/сут, из них 28 тыс. м<sup>3</sup>/сут — хозяйственно-бытовые стоки. В 1961 г. в городе была утверждена новая схема канализования, представляющая собой две локальные

<sup>59</sup> Доочистка сточных вод — последняя ступень очистки, которая представляет собой очистку от органических загрязнений, нефтепродуктов, мельчайших неорганических взвесей, избытка фосфора и азота методом фильтрации.

<sup>60</sup> Обеззараживание (дезинфекция) сточных вод — уничтожение патогенных микроорганизмов в сточных водах и предотвращение их попадания в водоем.

<sup>61</sup> С 1961 г. — Волгоград.

системы — Северную и Южную. Для отведения сточных вод с жилых районов северной части города и их дальнейшей очистки было принято решение построить очистные сооружения на острове Голодном<sup>62</sup>, куда сточные воды перекачивались насосными агрегатами по двум дюкерам, проложенным по дну Волги. Примечательно, что для их укладки и монтажа были привлечены ученые и специалисты Института электросварки им. Е. О. Патона. В 1969 г. этим Институтом был разработан способ «мокрой» механизированной подводной сварки для трубопроводов высокого давления на глубине 10 м (дно реки Днепр в городе Днепропетровске). Таким образом, в 1975 г. в Волгограде была пущена в эксплуатацию первая очередь очистных сооружений канализации производительностью 200 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а к 1978 г. — вторая очередь с такой же производительностью.

Также в конце 1960-х гг. было начато строительство крупного комплекса канализации в Самаре. В 1974 г. вступили в строй очистные сооружения механической очистки производительностью до 600 тыс. м<sup>3</sup>/сут, а в 1976 г. — сооружения биологической очистки с аэротенками.

Большую роль в развитии методов очистки сточных вод сыграло Постановление ЦК КПСС «О мерах по предотвращению загрязнений бассейнов рек Волги и Урала неочищенными сточными водами». До 1972 г. в Самарской области насчитывалось около 30 канализационных очистных сооружений (КОС).

В конце 1970-х гг. настоящей школой передовой технологии очистки сточных вод стала так называемая Новокурьяновская станция аэрации<sup>63</sup>, где работали первый и второй блоки производительностью 1 млн м<sup>3</sup>/сут каждый. Всего же суммарная производительность комплекса, включая объекты, возведенные в 1950-х гг., достигла 3 млн м<sup>3</sup>/сут. При строительстве станции было внедрено несколько типов сооружений, в основу которых легли принципы, используемые в отечественной практике впервые. Среди них следует отметить аэрируемые песколовки<sup>64</sup>, первичные радиальные отстойники диаметром 54 м глубиной 5,3 м

<sup>62</sup> Главный коллектор самотеком подводил стоки к главной насосной станции. Установленные в машинном зале высокопроизводительные вертикальные двухскоростные насосные агрегаты перекачивали сточные воды на остров Голодный двумя дюкерами, проложенными по дну Волги, а затем по железобетонным напорным трубам стоки поступали в приемную камеру с пятью механическими решетками. После решеток вода поступала в горизонтальные песколовки. Из песколовки стоки направлялись в преаэратор и затем в первичные отстойники. Биологическая очистка реализовывалась в аэротенках, а после во вторичных отстойниках обработанная сточная вода подавалась в канал, где происходило обеззараживание хлором. Через очистные сооружения ежедневно проходило 400 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Сооружения по обработке осадков располагались на левом берегу Волги.

<sup>63</sup> Канализация Москвы: десять лет в новом веке. — М. : Современная полиграфия, 2008.

<sup>64</sup> Аэрируемые песколовки — сооружения с поступательно-вращательным движением жидкости. Это резервуары удлиненной формы. Вращательное движение стоков в этих песколовках создается аэрацией стоков, которые в них находятся. Аэраторы представляют собой либо дырчатые трубы с отверстиями 3–5 мм, либо фильтросные пластины. Они располагаются по всей длине сооружения. Аэрируемая песколовка применяется для очистки сточных вод с высоким содержанием жиров при расходе воды свыше 20 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

со встроенным преаэратором<sup>65</sup>. Все емкостные сооружения были выполнены в сборном железобетоне. Также особенностью станции было отдельное расположение аэротенков и регенераторов<sup>66</sup>, что позволило уменьшить количество точек технологического контроля.

На Новокурьяновской станции аэрации был использован успешный опыт внедрения в 1960-х гг. на Зеленоградских очистных сооружениях технологии доочистки сточных вод. Для этого был создан мощный комплекс сооружений с уникальным блоком доочистки (для доочистки применялись барабанные сетки и фильтры с песчаной загрузкой). Мировая практика в то время не знала примеров внедрения подобной доочистки таких масштабов, включающей в себя сооружения глубокой очистки воды производительностью 2 млн м<sup>3</sup>/сут. Часть доочищенной воды подавалась в систему промводопровода с целью последующего применения на технические нужды предприятия, что обеспечивало более рациональное использование ценного ресурса (пресной воды) и уменьшение забора воды из водоисточников.

К концу 1978 г. объединение Курьяновских станций аэрации повысило мощности сооружений по очистке сточных вод до 3125 тыс. м<sup>3</sup>/сут, став самым мощным в Европе природоохранным комплексом. Здесь получили путевку в жизнь многие основные технологические процессы и были апробированы многочисленные варианты конструктивных типов сооружений и оборудования. Став основой типовых проектов на многие годы, в дальнейшем они получили распространение в других городах и во многих странах социалистического содружества.

Современные системы водоотведения, за исключением Москвы, в СССР по существу создавались во второй половине XX в. — так же, как и крупные проектные и научно-исследовательские институты с их филиалами, пусконаладочными организациями (оргтехналадки), которые вели пуско-наладочные работы и одновременно анализировали, обобщали опыт строительства канализаций как в промышленности, так и в коммунальном хозяйстве. Для ускорения строительства канализационных очистных станций и повышения качества самих проектов стало развиваться так называемое типовое проектирование. ВНИИВОДГЕО разрабатывал проекты для промышленности, а Академия коммунального хозяйства с выделением в ее структуре НИИ обеспечивала подготовку проектов для коммунального водоснабжения и очистки воды (НИИ КВОВ). Эти организации были основными научно-исследовательскими центрами страны в данной сфере. По экономическим соображениям большинство построенных

<sup>65</sup> Преаэратор — сооружение предварительной аэрации сточных вод для повышения эффекта их отстаивания. Преаэраторы предусматриваются перед первичными отстойниками в виде отдельных пристроенных или встроенных сооружений. Они обеспечивают снижение концентрации загрязнений сточных вод в процессе отстаивания, а также повышают эффект извлечения ионов тяжелых металлов и других загрязнений, присутствие которых затрудняет процесс биологической очистки сточных вод.

<sup>66</sup> Регенератор — это зона аэротенка с повышенной концентрацией активного ила, поскольку в регенераторе происходит меньшее, чем в аэротенке, разбавление ила сточной жидкостью. Поэтому введение регенератора приводит к экономии суммарного объема аэрационной зоны.

в этот период станций очистки являлись станциями совместной очистки бытовых и промышленных сточных вод.

К удачным инженерным решениям советского периода следует отнести практически все сооружения по осветлению и биологической очистке сточных вод: радиальные отстойники (в том числе большого диаметра и большой глубины) с илоскребками<sup>67</sup>, коридорные аэротенки-вытеснители<sup>68</sup>, фильтросные пластины<sup>69</sup> (которые служили 12–15 лет) и турбовоздуходувки<sup>70</sup>.

В результате удачных технологических решений стандартное качество очистки сточных вод в СССР в 1960–1970 гг. не уступало качеству очистки в Европе и США. Отечественные инженеры в тот период активно работали над конструкциями фильтров доочистки. Обеззараживание сточных вод в эти годы осуществлялось хлором или гипохлоритом, как правило, без автоматизации. Дехлорирование практически не применялось.

В конце 1980-х гг. был выполнен большой объем исследований: хлорирования сточной воды в сочетании с дехлорированием, озонирования, озонирования с катализаторами и ультрафиолетового обеззараживания. Проведение этих исследований позволило не только выбрать правильное направление развития на десятки лет вперед — ультрафиолетовое обеззараживание, нашедшее массовое применение в настоящее время в России и по всему миру, но и стимулировать в самых истоках зарождения метода развитие отечественной промышленности в данном направлении. Результатом этой работы стали достижения мирового масштаба — крупнейшие в мире цеха ультрафиолетового обеззараживания сточных вод на Люберецких и Курьяновских очистных сооружениях мощностью 1 млн м<sup>3</sup>/сут и 3 млн м<sup>3</sup>/сут соответственно. Эти цеха спроектированы инженерами Мосводоканала на основе исследований, проведенных учеными МосводоканалНИИпроекта. Оборудование УФ-обеззараживания, не имеющее по масштабу аналогов в мире, разработано и изготовлено компанией НПО «ЛИТ»<sup>71</sup>.

<sup>67</sup> Илоскребок предназначен для удаления осадка со дна отстойника и плавающих веществ с поверхности в первичном отстойнике системы механической очистки сточных вод.

<sup>68</sup> Аэротенк-вытеснитель представлен коридорным сооружением, в котором порция поступающей смеси очищаемых сточных вод и активного ила проходит последовательную очистку без полного смешения со всем объемом жидкости. В аэротенках данного типа глубина очистки сточных вод — функция расстояния, пройденного данной порцией стоков от точки впуска. Аэротенк-вытеснитель коридорного типа применяют при начальном БПК (биологическом потреблении кислорода) не более 500 мг/л.

<sup>69</sup> Фильтросная пластина — спрессованный шихтовый квадрат размером 30 × 30 × 50 см, имеющий поры величиной 75–125 мк для прохода воздуха. Применяется в аэротенках для повышения коэффициента использования воздуха и необходимой мощности воздуходувки.

<sup>70</sup> Турбовоздуходувка — это многоступенчатый лопастной компрессор. Воздуходувки в очистных сооружениях используются для аэрации сточных вод. Под аэрацией следует понимать наполнение сточной воды повышенной дозой воздуха. Это нужно, чтобы бактерии, которые есть в воде, окисляли содержащиеся в ней органические соединения, получая энергию и промежуточные вещества для своей жизнедеятельности. В результате биологического окисления образуются главным образом диоксид углерода и вода.

<sup>71</sup> НПО «ЛИТ» основано командой выпускников Московского физико-технического института в 1991 г. Занимается разработкой УФ-систем обеззараживания воды, воздуха, поверхностей и удаления дурнопахнущих веществ. Разработки внедряются во многих странах (Россия, Германия, Нидерланды, Венгрия, Китай, Корея).

Последняя четверть XX в. — период совершенствования технологий очистки, развития систем биологической очистки и обработки осадка сточных вод. Толчком к этому послужило принятие в 1980-х гг. жестких нормативов для сточных вод, сбрасываемых в водоемы рыбохозяйственного значения (ПДК<sub>рыбхоз</sub>)<sup>72</sup>. Эти нормативы приняты как основа для нормирования водопользователей (в том числе и водоканалов), которые продолжают действовать и поныне. Данные требования практически недостижимы даже при современном уровне очистки сточных вод, однако являются движущим фактором для развития природоохранных технологий. Например, в конце 1980-х — начале 1990-х гг. на московских очистных сооружениях начали проводиться исследования удаления азота методом нитри-денитрификации<sup>73</sup>.

В 1970–1990-х гг. наряду с ужесточением требований к качеству сбрасываемых в водоемы очищенных стоков наблюдался значительный рост объема сточных вод в связи с ростом жилищного строительства, строительством объектов санаторно-курортного назначения, развитием агропромышленного и строительного комплексов, промышленности. В этой связи во многих населенных пунктах были введены в эксплуатацию КОС<sup>74</sup>.

При проектировании новых или реконструкции действующих КОС в их состав стали вводиться дополнительные сооружения (доочистка в биологических прудах или на зернистых фильтрах<sup>75</sup>), а для удаления биогенных элементов — фосфора и азота — нитри- и денитрификаторы, аноксидные зоны<sup>76</sup> в аэротенках, дисковые денитрификаторы в схемах с дисковыми или барабанными биофильтрами<sup>77</sup> (рис. 14).

<sup>72</sup> Предельно допустимые концентрации вредных веществ для воды рыбохозяйственных водоемов, утверждены впервые Правилами охраны поверхностных вод от загрязнений сточными водами (Минрыбхоз СССР. 30 июня 1983 г. № 30-11-11); в настоящее время действуют Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 г. № 552).

<sup>73</sup> Нитрификация — процесс окисления кислородом воздуха аммонийного азота до нитритов и нитратов, осуществляемый нитрифицирующими микроорганизмами. На первой стадии процесса нитрификации аммоний окисляется до нитритов, на второй стадии нитриты окисляются до нитратов. Денитрификация (удаление из воды нитратов и нитритов) — процесс восстановления нитритов и нитратов до свободного азота (или закиси азота), который выделяется в атмосферу. Процесс может быть реализован при наличии в воде определенного количества органического субстрата, окисляемого сапрофитными микроорганизмами до CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O за счет кислорода азотсодержащих соединений.

<sup>74</sup> КОС — сооружения и комплекс оборудования для очистки сточных вод и обработки отходов (осадков сточных вод), образующихся после очистки.

<sup>75</sup> В зернистых фильтрах в качестве фильтрующего слоя используют насыпные материалы, в которых отдельные элементы не связаны между собой. К ним относятся: крупнозернистый песок, гравий, шлак, кокс, кусковая резина, пластмасса, керамические кольца и седла и другие материалы.

<sup>76</sup> Аноксидная зона — зона, где происходит процесс денитрификации. Растворенный кислород здесь практически отсутствует, но есть нитраты и органические вещества.

<sup>77</sup> Дисковый (погружной) биофильтр представляет собой вращающиеся диски, насаженные на одну ось параллельно друг другу и погруженные почти до оси в сточную воду. Очистка осуществляется биологической пленкой, развивающейся на поверхности дисков.

В это время активно развивались и технологии обработки осадка сточных вод. Среди оборудования и сооружений для механического обезвоживания осадка, внедренных в 1970–1980 гг., наиболее распространены были вакуум-фильтры. Однако влажность обезвоженного осадка была весьма высокой, а производительность фильтров — низкой. Также использовались центрифуги ОГШ (осадительные, горизонтальные, шнековые)<sup>78</sup>, еще их называют «декантерные центрифуги», работающие без реагентов.

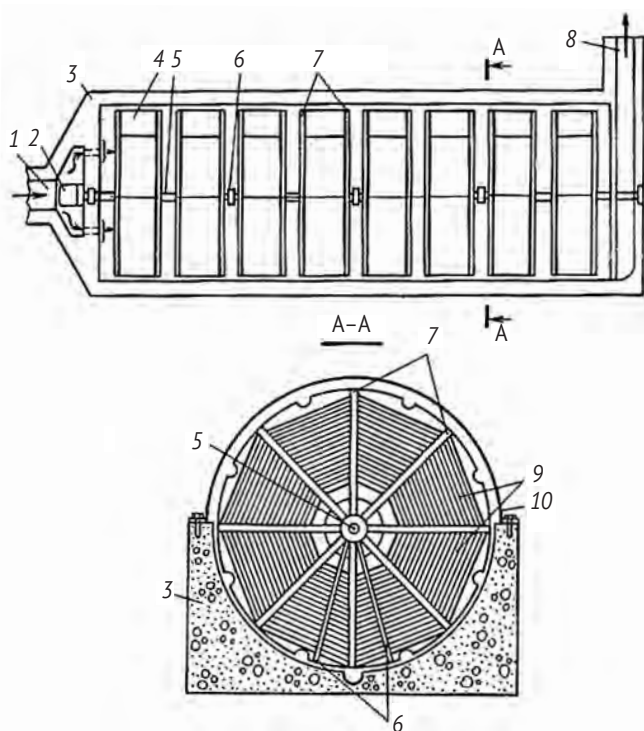


Рис. 14. Восьмисекционный погружной барабанный биофильтр:

1 — подводящий лоток; 2 — электродвигатель с редуктором; 3 — бетонный резервуар; 4 — секция биофильтра; 5 — вал; 6 — промежуточная опора со стойками; 7 — брусья секции со стержнями; 8 — отводящий лоток; 9 — гибкая пластмассовая пленка; 10 — кожух биофильтра

Освоение камерных фильтр-прессов<sup>79</sup> было весьма многообещающим. Советским специалистам удалось создать автоматический фильтр-пресс

<sup>78</sup> Центрифуга ОГШ (центрифуга осадительная с горизонтально расположенным ротором, со шнековым выгрузом осадка) — установка, в принципе действия которой заложено разделение суспензий и эмульсий, состоящих из фаз различной плотности (одна из которых жидкая, а вторая может быть представлена твердыми частицами). Процесс происходит в роторе установки, под воздействием центробежных сил.

<sup>79</sup> Камерный фильтр-пресс — высокоэффективное оборудование, которое применяется для разделения жидкой и твердой фаз в различных технологических процессах.



с горизонтальными плитами (ФПАКМ)<sup>80</sup>, который даже поставлялся на экспорт. Однако добиться надежной работы этого пресса для обезвоживания осадков сточных вод не удалось.

До конца 1980-х гг. подсушенный осадок активно вывозился на поля. В 1990 г. было принято решение прекратить вывоз осадка на сельскохозяйственные поля во избежание причинения непоправимого экологического ущерба сельскому хозяйству, поскольку при увеличении объема сточных вод промышленных предприятий, направленных на городские очистные сооружения, в осадке концентрировались токсичные тяжелые металлы и вредные органические соединения.

### *Современный период*

Объем сточных вод, пропущенных городскими канализациями, возроставший до 1992 г., затем снижался вплоть до 2000 г. Это снижение по сравнению с 1990 г. составило 12,1 млн м<sup>3</sup>/сут, или 20,7%, что объясняется уменьшением водопотребления. Одновременно происходило снижение объемов очищенных сточных вод, хотя и менее интенсивное, так что доля очищенных сточных вод в целом несколько увеличилась. Возросла и роль биологической очистки, в том числе с доочисткой, но при этом почти вдвое вырос объем недостаточно очищенных сточных вод. Данный показатель заслуживает особого внимания, поскольку известно, что водные объекты-приемники сточных вод сильно загрязнены. Исходя из условного фонового загрязнения органы государственного надзора предъявляют повышенные требования к показателям состава очищенных сточных вод, сбрасываемых в водные объекты. Эти требования не всегда обоснованы и не учитывают реальных возможностей водоканалов по развитию и совершенствованию очистки сточных вод. Например, ряд водных объектов неоправданно отнесен к объектам рыбохозяйственного назначения с особо высокими требованиями к очистке сточных вод, хотя эти объекты давно утратили прежнее значение. В подобных случаях устанавливают предельно допустимые концентрации (ПДК) остаточных загрязняющих веществ в сточных водах: по БПК — 3 мг/л, по ХПК — менее 30 мг/л. Тогда как после традиционной биологической очистки значение этих показателей в несколько раз выше и может быть снижено лишь при доочистке на дополнительных сооружениях.

Однако ужесточение природоохранных требований для водопользователей привело к совершенствованию технологии биологической очистки сточных вод в конце 1990-х гг. Этот период развития биологической очистки характеризовался в России переходом от процессов окисления соединений углерода и нитрификации, характерных для последней четверти XX в., к процессам глубокой

<sup>80</sup> Автоматический камерный фильтр-пресс с горизонтальными плитами (ФПАКМ) предназначен для фильтрования суспензий с содержанием твердой фазы от 5 до 600 г/л с частицами размером не более 3 мм при 5–80°С и условии, что суспензия может транспортироваться по трубам диаметром 25 мм. Высокое давление фильтрования (до 1,5 МПа) позволяет успешно использовать фильтр для разделения суспензий, образующих сжимаемые осадки с высоким гидравлическим сопротивлением.

очистки от биогенных элементов — азота и фосфора. Переход сопровождался вовлечением в технологию очистки целого спектра новых микробиологических процессов: ацидофикации (преферментации)<sup>81</sup>, внутриклеточного накопления полифосфатов<sup>82</sup>, денитрификации, бескислородного окисления аммония (ANAMMOX)<sup>83</sup>. Сочетание разнородных, протекающих в различных условиях процессов в одной технологической схеме привело к необходимости выделения отдельных стадий, разделяющих условия культивирования различных групп микроорганизмов активного ила в пространстве или во времени. В отличие от традиционной технологии полной биологической очистки, в основе которой лежит обеспечение в иловой смеси необходимого содержания растворенного кислорода и на всех этапах биологической очистки поддерживаются аэробные условия, новые технологии были основаны на многостадийности — последовательном чередовании анаэробных, аноксидных и аэробных условий. Таким образом более сложные, чем раньше, современные технологические решения приходили на очистные сооружения.

С целью ускорения внедрения перспективных технологий 6 мая 1997 г. генеральным директором МГУП «Мосводоканал» С. В. Храменковым было принято решение (подписан приказ) о создании собственного научно-исследовательского центра (инженерно-технологического центра — ИТЦ), где впервые были разработаны и апробированы указанные инновационные технологии биологической очистки сточных вод. Так, первая в России технология типа «Анаммокс» (ANAMMOX) была разработана в АО «Мосводоканал» совместно с Федеральным исследовательским центром «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук.

Исследования, проведенные Инженерно-технологическим центром в 1998–2002 гг., позволили сформулировать в рамках использования «Кейптаунского» технологического принципа новые подходы к конструированию биореакторов для удаления азота и фосфора. Данные решения были реализованы в 2003–2004 гг. на отдельных экспериментальных линиях Люберецких очистных сооружений, на которых ранее проводились исследования процессов нитриденитрификации.

Разработанное специалистами ИТЦ технологическое решение по биологическому удалению соединений азота и фосфора с использованием классического УСТ-процесса, организованного в биореакторах-вытеснителях, было заложено в проект реконструкции новых блоков Курьяновских очистных сооружений.

<sup>81</sup> Преферментация — специально организованный процесс образования растворимого, биологически легко доступного органического вещества (летучих жирных кислот — ЛЖК) путем анаэробной обработки в первичных резервуарах взвешенного или осажденного органического вещества, содержащегося в хозяйственно-бытовых и промышленных сточных водах, с целью использования полученных ЛЖК для повышения эффективности удаления биогенных элементов.

<sup>82</sup> Полифосфаты запасаются в клетках в виде гранул, что и обеспечивает высокое потребление фосфора из среды (сточной воды) — до 180 мг/г сухой биомассы.

<sup>83</sup> Технология бескислородного окисления аммония предназначена для очистки фильтрата центрифуг, обезвоживающих сброженный осадок сточных вод. Основа технологии — микробиологический процесс окисления аммония нитритом в бескислородных условиях.

Впервые в России 12 августа 2006 г. на Люберецких очистных сооружениях был введен в эксплуатацию новый блок биологической очистки для удаления биогенных элементов производительностью 500 тыс. м<sup>3</sup>/сут. И в настоящее время этот блок является крупнейшим в стране сооружением по удалению азота и фосфора.

После запуска блока удаления биогенных элементов в 2007 г. на Люберецких очистных сооружениях запущен в работу первый блок ультрафиолетового обеззараживания очищенной сточной воды производительностью 1,3 млн м<sup>3</sup>/сут. Построены и успешно эксплуатируются станции УФ-обеззараживания в Зеленограде и Южном Бутове, в Санкт-Петербурге.

Кроме разработки базовых схем биологической очистки сточных вод в ИТЦ за последние 20 лет были проработаны разные направления интенсификации биологической очистки. Самый очевидный путь повышения удельных показателей эффективности сооружений биологической очистки — повышение концентрации биомассы в биореакторе. Испытания показали хороший результат. Применение мембранного модуля позволило увеличить дозу активного ила на пилотной установке с 1,8–2,3 до 6,5–7,6 г/л. Было достигнуто высокое качество очищенной воды по взвешенным веществам и биогенным элементам, показана высокая устойчивость метода к залповым поступлениям промышленных сточных вод и высокая эффективность обеззараживания. Исследования показали, что применение мембранной технологии позволяет эффективно реализовать процесс биологического удаления азота и фосфора для городских сточных вод с относительно невысоким содержанием загрязнений с сокращением объема сооружений на 30%. Проведенные испытания позволили рекомендовать этот метод для внедрения на очистных сооружениях малой производительности в Троицком и Новомосковском административных округах (ТиНАО, территория Новой Москвы). Промышленная реализация мембранной технологии в АО «Мосводоканал» была осуществлена в 2015 г. на реконструированных очистных сооружениях производительностью 500 м<sup>3</sup>/сут в поселке Минзаг (город Троицк, ТиНАО).

В настоящее время очистные сооружения Москвы представляют собой мощные природоохранные комплексы, которые обеспечивают очистку хозяйственно-бытовых и промышленных стоков столицы, поступающих в городскую систему канализации Москвы, где проходят полный цикл очистки на Курьяновских, Люберецких, Южнобутовских, Зеленоградских очистных сооружениях, что исключает сброс неочищенных сточных вод в природные водоемы.

Канализационная сеть Москвы — это система трубопроводов, коллекторов, каналов и сооружений на них, предназначенная для приема, сбора и перекачки сточных вод на очистные сооружения канализации. Каждый год эта сеть увеличивается в среднем на 50 км в связи с появлением новых жилых застроек. Путь поступления сточных вод на городские очистные сооружения достаточно продолжителен. На первом этапе сточные воды от жилых застроек и промышленных предприятий самотеком поступают по внутренним и дворовым сетям в городские канализационные сети. Перекачка сточных вод осуществляется канализационными насосными станциями (КНС), большая часть из них работает

в автоматическом режиме. Уровень автоматизации городских КНС определяется важнейшими требованиями, предъявляемыми к системе водоотведения: обеспечение надежности, снижение эксплуатационных затрат, повышение безопасности и улучшение условий труда.

Современные методы прокладки и обслуживания трубопроводов и коллекторов гарантируют высокое качество и долговечность сетей. Надежность, долговечность и экологическая безопасность — основные требования, предъявляемые к канализационной сети города.

В условиях плотной городской застройки, насыщенности подземного пространства инженерными коммуникациями, наличия проезжих частей с интенсивным движением автотранспорта наиболее экономичными вариантами восстановления сети являются бестраншейные методы. Использование бестраншейных методов реконструкции<sup>84</sup> (рис. 15) позволяет значительно минимизировать земляные работы в городе, разрытия на проезжих частях автомобильных дорог и исключить некомфортный режим проживания жителей столицы.



Рис. 15. Бестраншейные методы прокладки трубопроводов

Современные полимерные материалы исключают развитие процессов газовой коррозии в трубопроводах, а также повреждения каналов и коллекторов в результате разрушающей биогенной коррозии, улучшают гидравлические характеристики трубопроводов и сокращают себестоимость эксплуатации канализационных сетей.

Проектированию и строительству очистных комплексов Санкт-Петербурга предшествовало изучение отечественного и мирового опыта эксплуатации очистных сооружений, отечественных и зарубежных нормативов проектирования. Во многом использовался опыт проектирования, строительства и эксплуатации московских станций аэрации. Появилась необходимость реализации международных соглашений по охране вод Балтийского моря.

На канализационных очистных сооружениях поселка Молодежное впервые в Санкт-Петербурге была внедрена технология очистки сточных вод с применением мембранных биореакторов. Проектная производительность КОС поселка

<sup>84</sup> Храменков С. В. и др. Бестраншейные методы восстановления водопроводных и водоотводящих сетей : учеб. пособие для вузов. — М. : ТИМР, 2000.

Молодежное составляет 2,5 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Внедрение технологии мембранной ультрафильтрации позволяет обеспечивать глубокую очистку сточных вод в условиях нестабильности стока по загрязняющим веществам и расходу. Сточные воды сначала проходят измельчение механических примесей на решетках-дробилках, затем насосами главной насосной станции подаются на комбинированные установки механической очистки, включающей в себя решетку с прозором 2 мм, песколовку и жирословку. Далее сточные воды поступают в высоконагружаемый аэротенк для биологической очистки с глубоким удалением биогенных элементов. Для интенсификации удаления фосфора из сточных вод предусматривается химическая очистка с использованием реагента сульфата алюминия. После аэротенка иловая смесь направляется на биомембранные установки. Для регулирования часовой и суточной неравномерности притока сточных вод от объекта курортной зоны канализования на сооружениях предусмотрены усреднители. Очищенные сточные воды подаются на установки ультрафиолетового обеззараживания, после чего сбрасываются в Финский залив по самотечному выпуску. Для обезвоживания избыточного ила предусмотрены два винтовых пресса.

Реализованное проектное решение с применением мембранных био-реакторов, предусматривающее объединение (блокирование) сооружений и оборудования по их расположению, а также исключение этапов первичного и вторичного отстаивания позволили обеспечить размещение новых сооружений в границах существующей территории (площадь земельного участка не позволяла разместить очистные сооружения с классической технологией очистки).

Все большее место занимают сооружения биологической очистки с прикрепленной биомассой. Из современных конструкций для выделения азота и фосфора следует выделить биофильтры с подвижной (плавающей загрузкой), эффективные как на основной стадии очистки, так и для глубокой доочистки.

Обработка осадка сточных вод является важным и одним из самых затратных процессов на городских очистных сооружениях. Так, в течение целого ряда лет на Курьяновских очистных сооружениях велись разработки высокоэффективной технологии механического обезвоживания осадка. Испытывались вакуум-фильтры, барабанные сушилки<sup>85</sup>, фильтр-прессы, центрифессы, ленточные фильтр-прессы<sup>86</sup>, камерные мембранные

<sup>85</sup> Барабанная сушилка — сушилка в виде металлического барабана, в котором сушка, перемешивание и продвижение частиц осуществляются за счет вращения барабана и продольного движения агента сушки. Используется для термической сушки механически обезвоженных осадков сточных вод.

<sup>86</sup> Ленточный фильтр-пресс относится к устройствам, предназначенным для обезвоживания сырых и сброженных осадков сточных вод городских станций аэрации. Конструкция ленточного фильтр-пресса позволяет обеспечить продолжительный срок службы фильтровального полотна, высокую эффективность обезвоживания обрабатываемого осадка, эффективность восстановления проникающей способности фильтрующих поверхностей, предотвращение увеличения влагосодержания обезвоживаемого осадка в процессе промывки фильтрующих поверхностей, надежность работы и простоту обслуживания и эксплуатации установки.

фильтр-прессы<sup>87</sup>, а также флокулянты<sup>88</sup> («Праестол-650», «Зетаг», «Феннопол К 508», «Продефлок С 4115»).

В 1994 г. на станции были смонтированы новые более производительные фильтр-прессы фирм «Нетч» (Германия) и «Дифенбах» (Италия) взамен прежних менее эффективных.

В конце 1990-х гг. на Люберецких очистных сооружениях в Москве и в Волгограде на острове Голодном были смонтированы и эксплуатировались мембранные фильтр-прессы, конструкция которых позволяла эффективно обезвоживать осадок, кондиционированный с применением полимерных флокулянтов. Но впоследствии они были демонтированы как морально устаревшее оборудование.

В Новосибирске на 29 насосных станциях перекачки сточных вод внедрена автоматизированная система управления, показавшая высокую надежность работы не только технических и программных средств, но и всего оборудования насосных станций. Обезвоживание осадков сточных вод Новосибирска является не только технически сложной задачей, но и требует огромных финансовых затрат. Выбор способов обезвоживания определяется наличием земельных площадей и оборудования, стоимостью флокулирующих реагентов. В настоящее время на очистных сооружениях канализации Новосибирска эксплуатируется 96 иловых площадок общей площадью 117 га. Для интенсификации процессов обезвоживания на иловых площадках сотрудники ООО НПФ «Экохим» в 2000 г. предложили новый композиционный флокулянт «Сибфлок»<sup>89</sup> на основе высокомолекулярного полиэтиленоксида. Модифицированный флокулянт «Сибфлок» снижает влажность осадка до показателей, сравнимых с показателями при механическом обезвоживании на центрифугах.

Таким образом, в подавляющем большинстве случаев вся обработка осадка на практике так или иначе сводится к его обезвоживанию. Например, в процессе очистки городских сточных вод на московских очистных сооружениях образуется около 9 млн м<sup>3</sup>/год жидких осадков, требующих переработки и обеззараживания. Это сложный технологический процесс с использованием современных технологий. Применяемое ранее оборудование механического обезвоживания в настоящее время заменено более современным. Сгущение осадка происходит на ленточных сгустителях, сбраживание — в метантенках, уплотнение и обезвоживание — на высокопроизводительных и экологических центрифугах (декантерах) вместо устаревших фильтр-прессов и илоуплотнителей.

<sup>87</sup> Мембранный фильтр-пресс принадлежит к технологическим установкам циклического действия, основным элементом которых является пакет мембранных фильтровальных плит, установленных на раме. В плитах предусмотрены каналы для подачи суспензии и отвода фильтрата, а также функция сжатия кека мембранами. Используется для получения осадка с низкой влажностью, а также для процессов, где требуется промывка кека в фильтр-прессе, например, для обезвоживания иловых осадков очистных сооружений.

<sup>88</sup> Флокулянты — это водорастворимые высокомолекулярные соединения, которые при введении в дисперсные системы адсорбируются или химически связываются с поверхностью частиц дисперсной фазы и объединяют частицы в агломераты (флоккулы), способствуя их быстрому осаждению.

<sup>89</sup> На бровке иловой площадки была смонтирована установка по приготовлению раствора «Сибфлока». Флокулянт разводится иловой водой из накопительного бассейна. В месте подвода осадка был установлен смеситель для смешения его с раствором флокулянта.

В последние годы развитие сооружений очистки сточных вод неразрывно связано с ресурсосбережением и сокращением выбросов парниковых газов. В результате сбраживания осадка сточных вод вырабатывается ценное топливо (биогаз), которое является возобновляемым ресурсом и может быть использовано в качестве альтернативного источника энергии. Мини-ТЭС, работающие на биогазе, — это экологически чистые источники энергии. Данное направление в последнее десятилетие широко развивается во всем мире в связи с сокращением запасов ископаемого топлива и проблемой глобального потепления.

На очистных сооружениях АО «Мосводоканал» на биогазе, образующемся в процессе очистки сточных вод, успешно работают теплоэлектростанции. Мини-ТЭС обеспечивают электроэнергией 50% основных технологических потребителей на очистных сооружениях и работают параллельно с сетью ОАО «МОЭСК». Это гарантирует бесперебойную работу сооружений даже в случаях перебоев в энергоснабжении.

Водоканал Екатеринбурга пошел по тому же пути. Обработка осадка на Северной аэрационной станции (САС) (рис. 16) осуществляется с помощью технологии стабилизации осадка методом анаэробного сбраживания в метантенках; в результате этого процесса образуется биогаз, который применяется для подготовки тепла на собственные нужды станции.



Рис. 16. Установка утилизации илового осадка в Екатеринбурге

Сначала осадок попадает в узел механического сгущения активного ила. Для реализации этого процесса на САС установлены две параллельно работающие машины механического сгущения закрытого типа. Сгустители действуют

по принципу перемещения обработанного реагентом осадка через медленно вращающийся барабанный фильтр. Осадок остается в барабане, в то время как вода проходит через поверхность фильтра. На следующем этапе осадок попадает в узел сбраживания в метантенках. Хранение и накопление биогаза осуществляется в газгольдере. Утилизация образующегося в метантенках биогаза происходит путем сжигания в водогрейном котле с последующим использованием тепловой энергии для поддержания необходимой температуры в метантенках. Котельная автоматизированная и работает без постоянного присутствия персонала. Таким образом, благодаря использованию данной технологии уменьшается количество осадка, улучшаются его органолептические свойства, запаха становится значительно меньше, а станция получает дополнительный энергетический ресурс.

В Санкт-Петербурге обработку и обезвреживание осадков, образующихся в процессе очистки сточных вод, осуществляют с помощью обезвоживания (на центрифугах или центрипрессах) с последующим сжиганием<sup>90</sup>. Осадки от очистных сооружений Санкт-Петербурга содержат соли тяжелых металлов в значительных количествах, что не позволяет использовать их в сельском хозяйстве. Для решения экологических задач по утилизации осадков сточных вод в городе построены и находятся в эксплуатации три завода по сжиганию осадка сточных вод на крупнейших городских канализационных очистных сооружениях: Центральной станции аэрации (с 1997 г.) (рис. 17), Северной станции аэрации (с 2008 г.) и Юго-Западных очистных сооружений (с 2008 г.)<sup>91</sup>. За составом дымовых газов на заводе по сжиганию осадка сточных вод Юго-Западных очистных сооружений следят улитки. Параметры образующегося пара на заводах сжигания позволяют его использовать в качестве вторичного энергетического ресурса для обеспечения отопления производственных зданий и выработки электроэнергии на турбогенераторах.

В современном мире ни один из крупных городов не может обойтись без работы комплекса по приему, перекачке и очистке сточных вод. В каждом сложном технологическом процессе, а транспортировка и очистка сточных вод — подчас не только сложный, но и опасный технологический процесс, не обойтись без появления «отходов производства». В данном случае отходом являются периодически появляющиеся специфические запахи канализации. Неприятные запахи выделяются от точечных источников, таких как канализационные насосные станции, вентиляционные вытяжки каналов и коллекторов. Также проблема запахов существует и на очистных сооружениях и связана с большими площадями поверхностных открытых технологических сооружений.

<sup>90</sup> Сжигание осадков сточных вод производится в печах с псевдооживленным слоем. Обезвоженные осадки поступают в псевдооживленный слой, за счет турбулентности песка быстро подвергаются деструкции: испарению воды и сжиганию органической части. Воздух псевдооживления играет роль компонента, поддерживающего горение и слой песка во взвешенном состоянии. Сгорание летучих веществ начинается в слое песка и завершается в камере сгорания. Температура дымовых газов в камере сгорания превышает 850°С, продолжительность обработки превышает 2 с. Эти условия гарантируют полное сгорание органических веществ. При понижении температуры в камере сгорания менее 850°С обеспечивается подача природного газа через газовые форсунки.

<sup>91</sup> Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге.





Рис. 17. Завод по сжиганию осадка сточных вод.  
Центральная станция аэрации, Санкт-Петербург

В Москве успешно реализована программа по борьбе с запахами (рис. 18), включающая в себя перекрытие всех сооружений защитными кожухами и установку современных станций газоочистки.

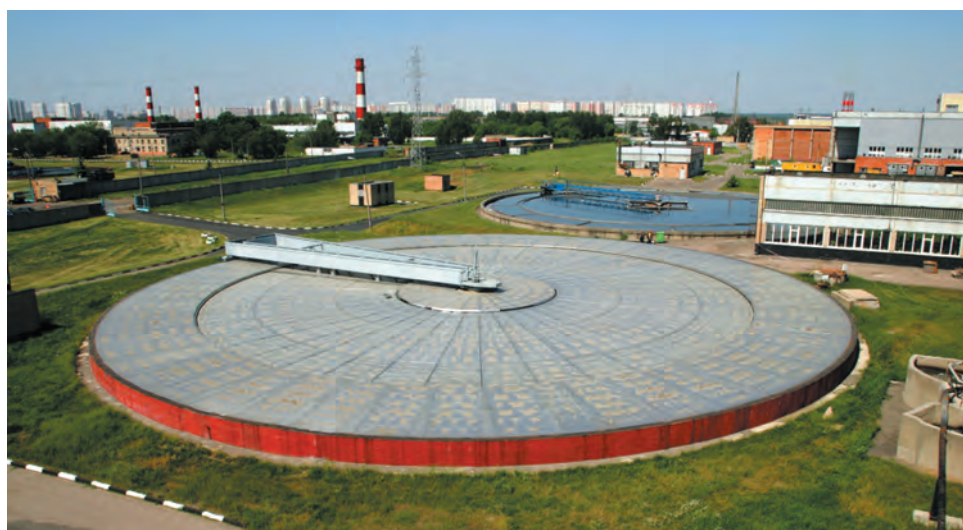


Рис. 18. Устранение специфических запахов  
на объектах канализации «Мосводоканала»

Для решения проблемы неприятного запаха осадка в районе Южной аэрационной станции (ЮАС) Водоканала Екатеринбурга проводится внедрение в производственный цикл новой технологии, что позволяет значительно снизить расход воды на собственные нужды — с 20 до 4%. Для этого специалисты Водоканала Екатеринбурга решили пойти по пути, который не применялся еще нигде в России. Было решено ликвидировать неприятный запах на стадии обработки осадка до и после фильтр-процессов. На последней стадии обработки, в цехе механического обезвоживания, осадок (кек) должен обрабатываться специальными реагентами, которые заглушают неприятный запах. На стадии обезвоживания в осадок вводят известь, гипохлорит натрия, гумифицирующие препараты, после чего все перемешивают с торфом. После обработки осадка реагентом осадок видоизменяет свой запах, который становится менее выраженным, но полностью не исчезает. На следующем этапе в кек добавляется препарат «Инхетон». Он вводится вместе с флокулянтом на стадии обезвоживания, при этом купируется практически весь неприятный запах.

В настоящее время в зону ответственности водоканалов входит ливневая канализация (ливневые стоки) с городских территорий. В России разрабатываются и внедряются новые системы ливневой канализации, которые предполагают не только отвод с асфальтированных территорий и других площадок с твердым покрытием стоков (во избежание затопления территорий), но и очистку этих стоков перед отводом в водный объект от взвешенных веществ, нефтепродуктов, тяжелых металлов, а также обеззараживание стоков.

В Москве, как ни в одном другом мегаполисе мира, остро стоит проблема очистки улиц от снега и его утилизации. До 2002 г. снег, убираемый с городской территории и проезжей части, сбрасывался в реки Москву и Яузу, что негативно сказывалось на экологическом состоянии водоемов и прибрежной зоны. Для улучшения экологической обстановки в Москве и исключения сброса снега в водоемы Москвы АО «Мосводоканал» построил 35 снегосплавных пунктов (ССП), расположенных во всех административных округах Москвы, общей производительностью 140 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Процесс технологической переработки (плавления) снежной массы осуществляется за счет подачи в снегоприемные бункеры сточной воды из городских канализационных каналов и коллекторов (рис. 19). При контакте со сточной водой, среднегодовая температура которой составляет 18°С, снег растапливается и сбрасывается обратно в канализационные каналы. Для измельчения снежной массы и отсеивания крупного мусора в приемных бункерах установлены сепараторы-дробилки.

Собранный с городских магистралей снег поступает на городские канализационные очистные сооружения для последующей очистки. Поскольку московские очистные сооружения обеспечивают высокую эффективность очистки от взвешенных веществ и нефтепродуктов, экологический ущерб от загрязненного снега городским водоемам полностью предотвращен.

Проект утилизации снега на снегосплавных пунктах, построенных на коллекторах московской канализации, получил распространение и в других городах нашей страны. Так, сейчас ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

эксплуатирует 11 стационарных снегоплавильных пунктов и семь стационарных инженерно-оборудованных снегоприемных пунктов. Также снегоплавильные пункты успешно реализованы на канализационных коллекторах в городах Уфе, Новосибирске и Екатеринбурге.

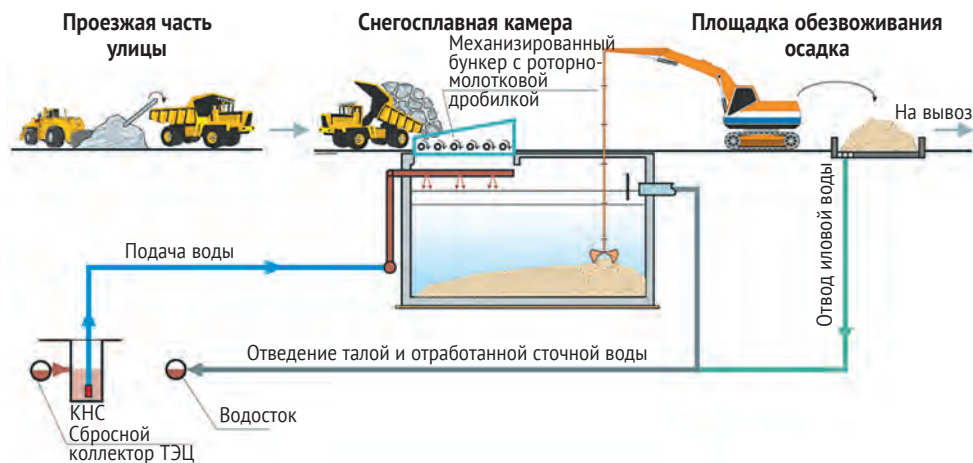


Рис. 19. Проект снегоплавильного пункта на канализационном коллекторе (МосводоканалНИИпроект)

## ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ КАНАЛИЗАЦИИ РФ

Под водоотведением принято понимать комплекс санитарных мероприятий и инженерных сооружений канализации, обеспечивающих сбор сточных вод, образующихся на территории населенных пунктов и промышленных предприятий, удаление (транспортирование) этих вод за пределы населенных пунктов, а также их очистку и обеззараживание.

В 2019 г., по статистическим данным, в целом по Российской Федерации (рис. 20) через системы водоотведения пропущено 8 673 422 тыс. м<sup>3</sup> сточных вод, из которых 60% составили сточные воды от населения.

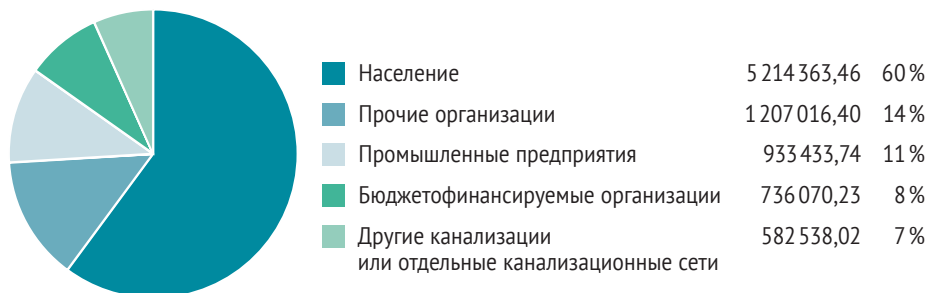


Рис. 20. Объем пропущенных через очистные сооружения сточных вод в 2019 г., тыс. м<sup>3</sup>

Сточные воды образуются в результате жизнедеятельности людей и работы промышленных предприятий и содержат значительное количество органических веществ. Такие вещества имеют способность быстро гнить и служить благоприятной средой для развития различных микроорганизмов и бактерий, которые оказывают пагубное воздействие на человека и животных. В современных реалиях это представляет серьезную угрозу для населения и требует незамедлительного удаления сточных вод за пределы жилой зоны и их очистки<sup>92</sup>.

### Виды сточных вод и систем водоотведения

Классификацию сточных вод можно провести по различным признакам, например, по источнику происхождения или по составу и свойствам загрязнений. В настоящее время в России принята классификация сточных вод (СВ) в зависимости от условий образования (табл. 4).

Таблица 4. Классификация сточных вод

Вид сточных вод	Происхождение
Хозяйственно-бытовые	Образуются в результате хозяйственно-бытовой деятельности в жилом секторе, на объектах социально-культурной сферы, на всех предприятиях (от санузлов, кухонь, мест приема пищи и т. п.)
Производственные	В процессе производства товаров и предоставления услуг
Поверхностные (дождевые, талые, инфильтрационные, поливочные, дренажные воды, принимаемые в централизованную систему водоотведения)	В результате выпадения дождей, таяния снега, мойки дорожных покрытий, при искусственном водопонижении, а также при инфильтрации в коллекторе

В зависимости от способа транспортировки поверхностных сточных вод на территории поселений и промышленных зон применяют общесплавную, полную раздельную, неполную раздельную или полураздельную систему водоотведения (канализации) (табл. 5)<sup>93</sup>.

В большинстве крупных городов Российской Федерации канализация построена по принципу полной раздельной системы: одна из сетей предназначена для отведения городских сточных вод, другая — служит для транспортировки поверхностных сточных вод. В ряде населенных пунктов используется общесплавная система водоотведения.

<sup>92</sup> Игнатьева Л. П., Потапова М. О. Санитарная охрана водных объектов : учеб. пособие. — Иркутск, 2016.

<sup>93</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. — 2019.

Таблица 5. Виды систем водоотведения

Вид системы водоотведения	Описание, условия применения	Преимущества	Недостатки
Общесплавная	Прокладывается одна сеть трубопроводов, по которой на очистные сооружения транспортируются все категории сточных вод: бытовые, производственные и поверхностные (дождевые, талые и поливомоечные)	Соответствует высоким требованиям благоустройства населенных пунктов	Очень большие затраты на строительство сетей и насосных станций, очистных сооружений. При выпуске части сточных вод в водный объект (при осадках нерасчетной интенсивности) происходит загрязнение разбавленными ГСВ. В сильные дожди и паводки нарушается стабильная работа сооружений очистки ГСВ. Выделение запахов через дождеприемные решетки
Полная раздельная	Применяются две сети: городская канализация, в которую принимают хозяйственно-бытовые и допущенные к приему производственные сточные воды (их смесь именуется городскими сточными водами – ГСВ), и дождевая канализация. В крупных промышленных зонах используют производственные сети. Оптимальны независимо от крупности городов в климатических районах с большой интенсивностью дождей (не менее 80 л/с на 1 га продолжительностью 20 мин при периоде однократного превышения 1 год)	Для охраны водных объектов от загрязнения эти системы при наличии в их составе централизованных (или локальных) очистных сооружений (на каждой из систем) являются наиболее эффективными. Не производится сброс неочищенных ГСВ. Более стабильная работа очистных сооружений	Дорогостоящая. Прокладка двух и более сетей. В сложившейся практике в большинстве случаев дождевая канализация не имеет очистных сооружений
Неполная раздельная	Имеет лишь одну полноценную водоотводящую сеть – городскую канализацию. Поверхностные сточные воды отводятся по лоткам, кюветам и др.	Минимальные затраты на систему водоотведения	Отсутствие полноценной ливневой канализации является недостатком городской инфраструктуры, отнимает пространство, создает риски несчастных случаев, увеличивает загрязненность поверхностных сточных вод мусором
Полураздельная	Используются две водоотводящие сети: производственно-бытовая (городская) и дождевая. В местах их пересечения устраиваются разделительные камеры, которые (в зависимости от расхода) перепускают в городскую сеть поверхностные сточные воды	Оптимизация затрат на прокладку сетей. Очистка наиболее загрязненной части дождевого и всего талого стока производится совместно с ГСВ на сооружениях биологической очистки	–

При классификации сточных вод важно четко разделить их по наличию или отсутствию в них прежде всего хозяйственно-бытовых сточных вод. По этому признаку для установления технологических показателей сточные воды поселений или городских округов, как правило, рассматриваются по двум группам: сточные воды, включающие в себя в том числе хозяйственно-бытовые сточные воды, принимаемые в централизованные бытовые, общесплавные и комбинированные системы водоотведения (далее — смешанные (городские) сточные воды, ГСВ), и поверхностные сточные воды, принимаемые в централизованные ливневые системы водоотведения (далее — поверхностные сточные воды, ПСВ). Однако даже при полных отдельных системах водоотведения только в теории поверхностные сточные воды не принимаются в систему городской канализации. На практике среднегодовой неорганизованный дополнительный приток поверхностного стока в систему городской канализации составляет 4–7 % общего поступления сточных вод в систему водоотведения. В периоды продолжительных интенсивных дождей и при снеготаянии неорганизованный среднесуточный приток может возрастать до 25–40 %.

Грань между поверхностным стоком с территорий, которые являются естественным источником питания гидрографической сети поселений, и сточными водами, которые должны отводиться и очищаться, очень условна. Поверхностные сточные воды — это загрязненный поверхностный сток с городских территорий, отличающихся значительным содержанием загрязняющих веществ, т. е. от промышленных зон, районов многоэтажной жилой застройки с интенсивным движением автотранспорта и пешеходов, крупных транспортных магистралей, торговых центров, а также с территорий промышленных и сельскохозяйственных предприятий. В то же время поверхностный сток территорий населенных пунктов, не подвергающихся антропогенному воздействию, загрязнен значительно меньше<sup>94</sup>.

### Многолетняя динамика водоотведения

Динамика водопотребления за последние 60 лет в разные периоды характеризуется прямо противоположно. В советский период водопотребление населенных пунктов неуклонно нарастало. Причинами этого были их стремительный рост, а также увеличение доли канализованных территорий, развитие промышленности, увеличение фактического водопотребления в условиях отсутствия учета воды, а также почти повсеместные утечки в быту через неисправные водоразборные приборы. В начале 1990-х гг., ненадолго удержавшись на достигнутом уровне, общее водопотребление в населенных пунктах стало стремительно (на 4–5 % в год) сокращаться. Причины — как резкое падение промышленного производства, так и снижение удельного водопотребления в быту.

К настоящему времени фактор снижения производства уже в основном исчерпал свое влияние. Но снижение водопотребления примерно на 2,5–3,5 % в год продолжается. Теперь уже его причиной является именно изменение удельного водопотребления, происходящее вследствие:

<sup>94</sup> СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.

- осознанной экономии воды населением там, где установлены квартирные водосчетчики (в совокупности с резким ростом стоимости воды);
- замены старого, протекающего сантехнического оборудования новым, надежным;
- регулирования напоров в сети, осуществляемого водоканалами.

Снижение водопотребления напрямую отражается на водоотведении. По данным Росстата в целом по Российской Федерации средний расход сточных вод в ЦСВ снизился с 42,3 млн в 1995 г. до 28 млн м<sup>3</sup>/сут в 2013 г., т. е. более чем на 1/3. В крупных городах снижение было более выраженным и достигало 50%. Данные за более поздний период отсутствуют, но тенденция в целом сохраняется.

Поскольку численность жителей существенно не меняется, то в результате снижения водоотведения все более четко прослеживается тенденция значительного роста загрязненности сточных вод.

Водоотведение по централизованной ливневой системе водоотведения определяется следующими факторами:

- охватом городских территорий коллекторной сетью данной системы;
- характеристиками территорий (доля водонепроницаемых покрытий, грунтовых поверхностей, газонов и т. п.);
- долей поверхностного стока, принимаемого (поступающего) в централизованную систему городской канализации;
- климатическими факторами<sup>95</sup>.

Как по условиям образования, так и по степени загрязненности в составе компонентов поверхностных сточных вод различают:

- дождевой сток;
- талый сток;
- поливомоечные сточные воды;
- дренажные и инфильтрационные сточные воды.

В ряде случаев в централизованную ливневую систему водоотведения осуществляется прием условно-чистых производственных сточных вод, соответствующих по своему составу условиям приема в данную систему<sup>96</sup>.

### Задачи и методы очистки сточных вод

Как отрасль очистка сточных вод возникла в России в конце XIX — начале XX в. практически одновременно с системами канализации. Представления о том, почему и до какой степени надо чистить сточные воды поселений, в последние 120 лет неоднократно изменялись. Всегда в основе этих представлений была необходимость защиты водных объектов от загрязнения, однако цели и направления этой защиты последовательно расширялись по мере углубления знаний о процессах в водных объектах и о составе сточных вод<sup>97</sup>.

<sup>95</sup> Воронов Ю. В., Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод. — М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006.

<sup>96</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.

<sup>97</sup> Шувалов М. В. Диалектика совокупности теоретических, методологических и нормативных положений, применяемых для проектирования канализации поселений // Градостроительство и архитектура. — 2018. — № 2. — С. 35–45.

Изначально, как уже было отмечено, преследовалась цель защиты источника питьевого водоснабжения, поэтому в начале развития отрасли, во второй половине XIX в., под загрязнениями подразумевали оседающие органические вещества, для удаления которых были разработаны отстойники различных конструкций, затем, с начала XX в., — также и другие органические загрязнения. Практически сразу универсальным методом их удаления стала биологическая очистка (так называемая вторичная, после первичной — в отстойниках), которая, начав развиваться как метод естественной очистки (поля фильтрации, биопруды), быстро трансформировалась в искусственный процесс. Технологии очистки в аэротенках (с помощью активного ила — свободно плавающего сообщества микроорганизмов, формирующего флоккулы) и в биофильтрах (с помощью прикрепленной биопленки) были разработаны практически одновременно. Однако вначале преимущественное развитие в СССР получили щебеночные биофильтры как более простые сооружения, не требующие специального оборудования (воздуходувных агрегатов и аэраторов). На уровне малых и небольших очистных сооружений городских сточных вод эти сооружения были преимущественно распространены вплоть до 1970-х гг. и сегодня эксплуатируются на очень многих объектах. На всех объектах очистки, построенных в тот период, используется классический набор сооружений механической очистки, включающий в себя процеживание, удаление песка и первичное отстаивание.

Следующей задачей, которая стала решаться, было обеззараживание сточных вод, на практике тождественное их хлорированию. На всем протяжении этого периода развития очень большое воздействие на нее оказывала санитарно-гигиеническая наука.

Во второй половине XX в. подотрасль начала развиваться и как природоохранная, а не только санитарная. В 1960–1970 гг. на фоне массового строительства водохранилищ была осознана проблема негативного влияния на водные объекты азота и фосфора (биогенных элементов). Это привело к бурному развитию технологий, направленных на их удаление, а затем к промышленному внедрению.

Одновременно с развитием методов очистки сточных вод возникла задача обработки осадка. В первые десятилетия развития подотрасли она решалась использованием иловых площадок, затем, с ростом масштабов очистных сооружений, появилась необходимость в более быстром и эффективном сокращении объема осадка, что привело к созданию аппаратов механического обезвоживания. Нестабильные свойства осадка, склонность к быстрому загниванию потребовали развития методов стабилизации (обеспечения стабильности осадка при хранении и использовании). Стремление уменьшить объемы удаляемого осадка привело к развитию технологий термической обработки (сушка, сжигание и др.)<sup>98</sup>.

Современная инженерная наука и практика различают следующие задачи, решаемые отраслью очистки городских сточных вод и обеспеченные специальными разработанными технологиями и методами расчета:

<sup>98</sup> Хисамеева Л. Р. и др. Обработка осадков городских сточных вод : учеб. пособие. — Казань : Изд-во Казанск. гос. архит.-строит. ун-та, 2016.



- удаление грубодисперсных примесей, песка, плавающих веществ;
- удаление органических загрязнений (без выделения индивидуальных веществ);
- удаление соединений азота и фосфора;
- обеззараживание очищенных вод;
- обработка осадков сточных вод с целью получения побочной продукции (биогаза, органического удобрения, почвогрунта, рекультиванта и т. п.) или практически неопасного или малоопасного отхода, предназначенного для размещения в окружающей среде.

Нерешенность одной или нескольких из этих задач на конкретных очистных сооружениях формирует экологические проблемы, связанные с данным объектом.

Начиная с 70-х гг. XX в. активно изучается проблема тяжелых металлов, затем токсичных органических веществ, однако в основном применительно к осадкам сточных вод, где могут накапливаться эти вещества, извлекаемые в процессе очистки. Результатом этих исследований стали как технологические, так и административные решения в этой сфере. Применительно к сточным водам поселений не были разработаны и не применяются специфические технические решения для дополнительного снижения концентраций тяжелых металлов и вредных органических соединений.

В XXI в. большое внимание уделяется воздействию гормональных и лекарственных препаратов на высшие водные организмы и на организм человека (через попадание в водозаборы). Однако эти исследования пока что не получили технологического развития применительно к сточным водам поселений.

### Современный технологический процесс водоотведения

Для осуществления технологического процесса водоотведения городских сточных вод необходим комплекс сетей и сооружений, которые предназначены для организованного приема и удаления по трубопроводам за пределы населенных пунктов сточных вод, а также для их очистки и обезвреживания перед утилизацией или сбросом в водоем.

Все канализационные сооружения можно разделить на две группы. К первой относятся оборудование и сооружения, предназначенные для приема и транспортировки сточных вод. Все сточные воды собираются в систему наружной канализационной сети, представляющей собой разветвленную подземную сеть труб и каналов, по которым сточная вода поступает на очистные сооружения. Ко второй группе относятся сооружения, где сточная вода очищается и обеззараживается, а также происходит обработка образуемого на очистных сооружениях осадка сточных вод.

подавляющее большинство технологических схем очистных сооружений городских сточных вод полного цикла включает в себя следующие основные (обязательные) этапы:

- механическая очистка;
- биологическая очистка;

- обеззараживание очищенной воды;
- обезвоживание осадка.

Все остальные технологические процессы могут присутствовать или нет. Минимальная технологическая схема необязательно означает неполную, неэффективную либо самую дешевую. Она может быть и весьма эффективной, и (или) весьма дорогостоящей.

Любая технология, не содержащая перечисленные обязательные этапы очистки, является неполной и недостаточной. Такие технологии также находят применение, однако они оправданы исключительно в специальных условиях. К таковым относится, например, технология без биологической очистки с использованием физико-химической обработки и фильтрационной очистки. Этот процесс вынужденно применяется на некоторых удаленных объектах с временным (сезонным) пребыванием, где сооружения биологической очистки не могут быть использованы, так как они требуют длительного запуска (наращивание биомассы в течение 2–3 месяцев). Подход, практикуемый в России, заключается в том, что приоритетным условием является соблюдение санитарно-гигиенических нормативов. Отсюда следует, что предприятие должно обеспечить такое поступление загрязняющих веществ в природную среду (сброс), при котором эти вещества смогут рассеяться до неопасных предельно допустимых концентраций в определенных местах<sup>99</sup>.

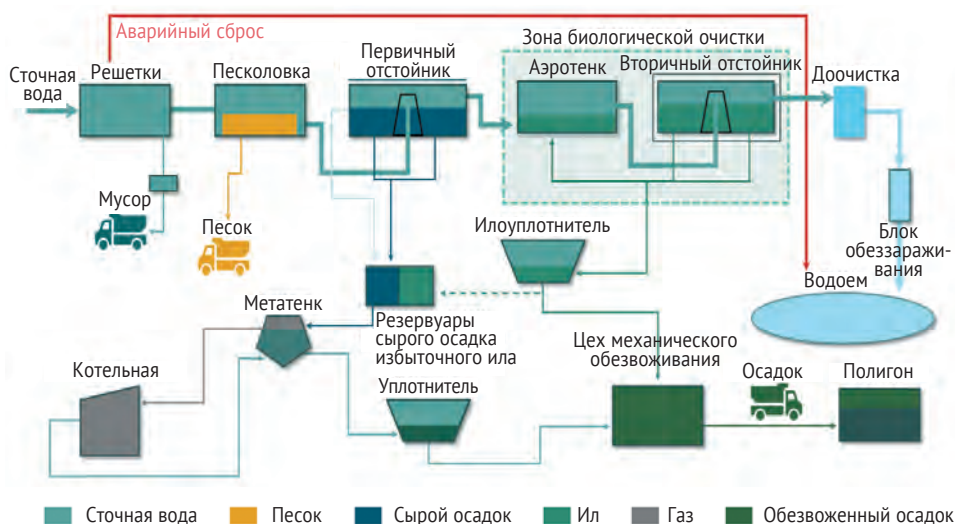


Рис. 21. Схема очистки сточных вод полного цикла

Важно отметить, что обеззараживание не имеет никакого экологического значения (для водных объектов понятие патогенных микроорганизмов лишено

<sup>99</sup> Экологические основы охраны водных ресурсов : учеб. пособие / А. Ф. Никифоров, А. С. Куртергин, В. С. Семенищев, С. В. Никифоров. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019.

смысла), а лишь санитарно-эпидемиологическое. Поэтому в тех регионах и в те сезоны (холодное время года), где и когда контакт человека с водой водного объекта отсутствует, а разбавление высокое, нет никаких обоснований для использования обеззараживания, кроме нормативного требования.

Пример полной схемы технологии очистки сточных вод приведен на рисунке 21.

Правильно спроектированные и нормально работающие сооружения предварительной механической очистки обеспечивают эффективную работу последующих ступеней очистки сточных вод и обработки осадка. Отсутствие либо ненадлежащая работа сооружений предварительной механической очистки оказывает негативное воздействие на очистные сооружения ГСВ в целом.

### ***Задачи и возможности термодинамического анализа***

Вся техника, т. е. совокупность технических объектов, созданных человеком, работает на основе использования энергии. Поэтому естественно, что среди различных подходов к ее изучению, проектированию, эксплуатации и совершенствованию важнейшее место занимает энергетический.

Термодинамический анализ на базе эксергетического метода представляет собой метод энергетического подхода к изучению и разработке технических систем.

### ***Методы и подходы к анализу энергетической эффективности***

Оценка эффективности сложных и распределенных энерготехнологических систем, их энергетической эффективности — процесс системный и многофакторный. Она может базироваться только на качественном анализе существующего состояния энергопотребления на предприятии и является объективной при условии организации надлежащего коммерческого, внутрихозяйственного и технического учета энергии и энергоносителей.

В отличие от простых физических или термодинамических процессов с понятными критериями эффективности (КПД) переход к более сложным объектам и системам (включающим экологические и экономические оценки) неизбежно несет в себе наличие неучтенных погрешностей или искажений. При этом разноплановость процессов, происходящих в различных энерготехнологических системах, наличие разнообразных, по существу и формам, резервов повышения энергетической эффективности предопределяют необходимость обобщенного системного подхода, позволяющего выявлять разные типы резервов.

### ***Составление массового баланса работы очистных сооружений канализации***

Общий массовый баланс системы с учетом объемов очищенных сточных вод и осадка, выведенного из системы, представлен на рисунках 22 (ЗСО — зона санитарной охраны) и 23.

Входящие и выходящие потоки на примере Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга приведены в таблицах 6–8.

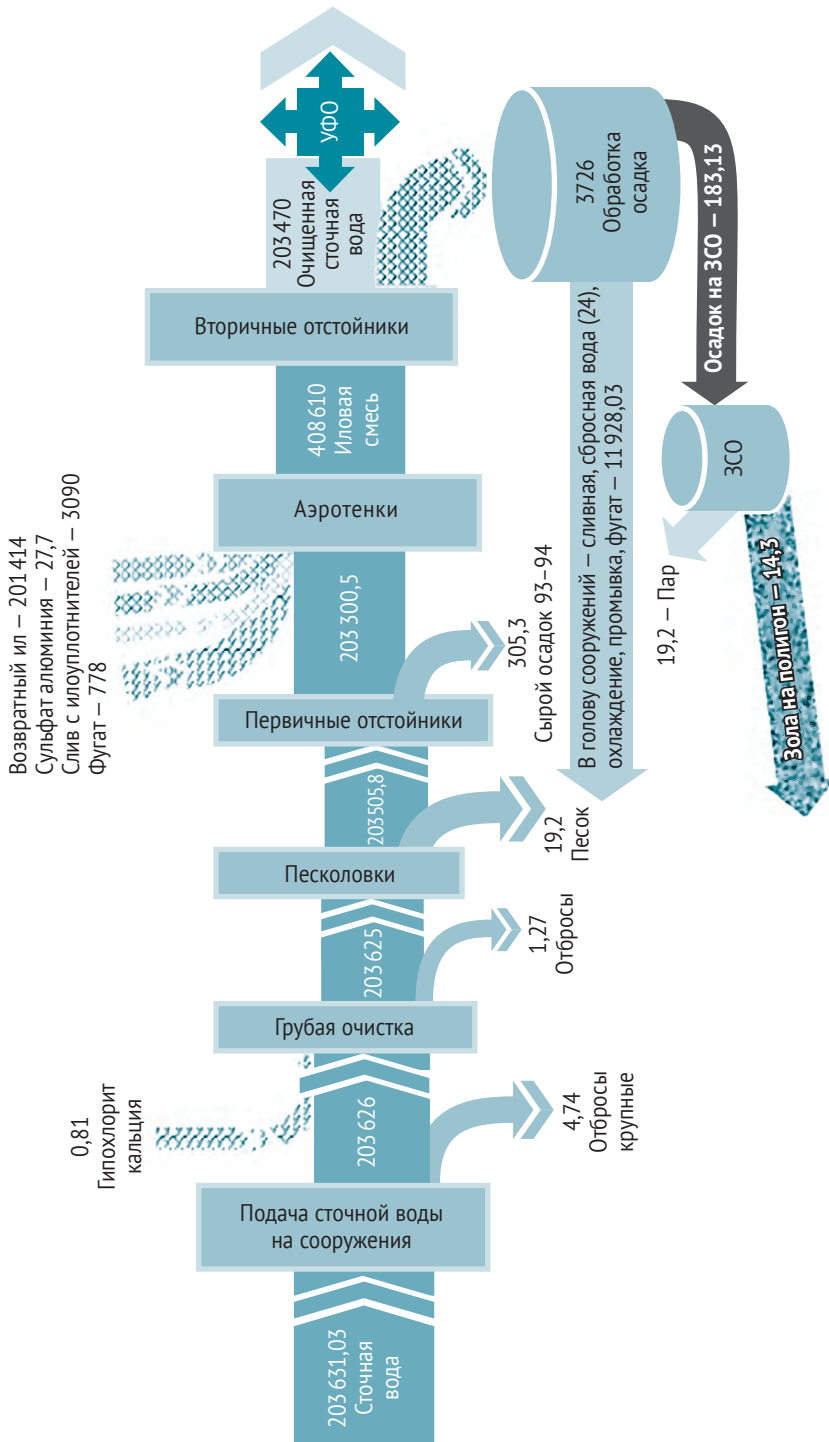


Рис. 22. Диаграмма потоков энергии (эксергии) для технологической схемы очистки сточных вод и обработки осадка на примере ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», м³/сут

Таблица 6. Эксергия. «Водоотведение». Входящие и выходящие потоки на примере Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга. Комплексный энергетический анализ обработки осадка сточных вод

Показатели	Количество обработанного осадка	Количество осадка сточных вод, обработанного в процессе, тонн сухого вещества		
	Количество осадка после механического обезвоживания	Количество осадка с иловых площадок	Количество осадка после механического обезвоживания	Количество осадка после механического обезвоживания
Обработка осадка сточных вод	431 815	25 911	2 176	0
Сгущение и (или) уплотнение	163 531	61 806	2 176	0
Стабилизация	421 708	170 893	0,00	0
Уплотнение стабильного осадка	69 265	4108,26	0,00	0
Механическое сгущение осадка с флокулянтами	73 861	9177,43	0,00	0
Транспортировка осадка	137 767	66,47	0,00	0
Механическое обезвоживание осадка на декантерах	170 893	53,703	0,00	0
Механическое обезвоживание на фильтр-прессах	61 806	66,47	0,00	0
Естественная сушка осадка на иловых площадках	2 176	66,47	0,00	0
Вывоз обезвоживание осадка с иловых площадок	25 911	66,47	0,00	0
Вывоз механически обезвоженного осадка	231 075	66,47	0,00	0

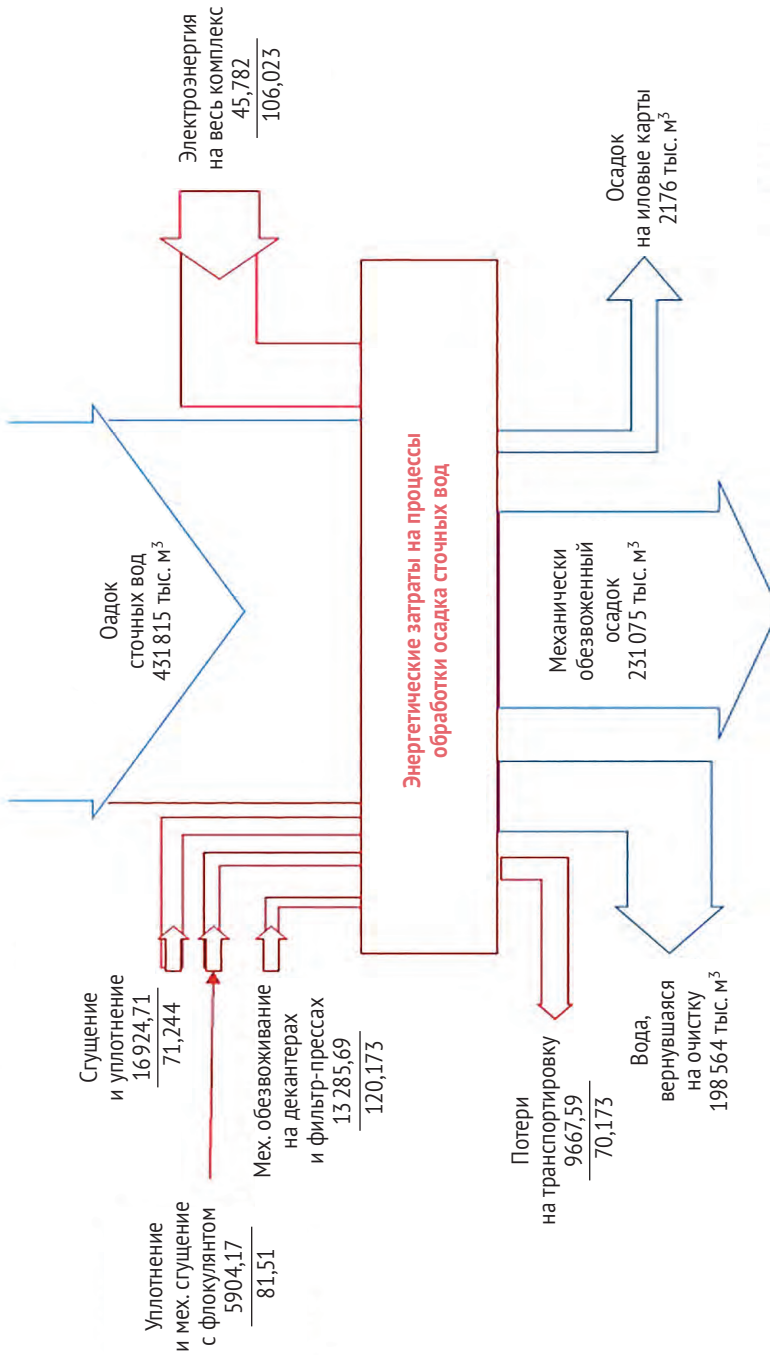


Рис. 23. Материальный и энергетический балансы

Таблица 7. Эксергия. «Водоотведение». Входящие и выходящие потоки на примере Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга. Очистка сточных вод

Технологический этап	Потоки	Тип	м <sup>3</sup> /сут	Примечание
Главная насосная станция	Входящие	Сточная вода	203 631,03	
	Выходящие	Сточная вода	203 626	
		Отбросы с крупных решеток, прозор 10 мм	4,74	Вывоз
Решетки, прозор 5–6 мм	Входящие	Сточная вода	203 626,00	
	Выходящие	Гипохлорит кальция	0,81	
		Отбросы	1,27	Прессование, вывоз
Песколовки	Входящие	Сточная вода	203 625,00	
	Выходящие	Песок	19,20	На песковые площадки
Первичные отстойники	Входящие	Сточная вода	203 605,80	
	Выходящие	Сырой осадок, влажность 93–94 %	305,30	В бак смешения для дальнейшего обезвоживания
Аэротенки	Входящие	Сточная вода	203 300,50	
		Возвратный ил	201 414,00	
		Сульфат алюминия	27,70	
		Сливная вода с илоуплотнителей	3090,00	В верхний канал аэротенков
		Фугат	778,00	В верхний канал аэротенков
	Выходящие	Иловая смесь	408 610,00	Во вторичные отстойники
Вторичные отстойники	Входящие	Иловая смесь	408 610,00	
	Выходящие	Сточная вода	203 470,0	
		Избыточный ил	3726,00	На илоуплотнители
		Возвратный ил	201 414,00	В аэротенки
УФО	Входящие	Очищенная сточная вода	203 470,00	
	Выходящие	Обеззараженная сточная вода	203 470,00	Сброс в водоем

Таблица 8. Эксергия. «Водоотведение». Входящие и выходящие потоки на примере Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга. Обработка осадка

Технологический этап	Потоки	Тип	м <sup>3</sup> /сут	Примечание
Илоуплотнители	Входящие	Избыточный ил, влажность 99,8 %	3726	
	Выходящие	Уплотненный ил, влажность 95–96 %	635	В бак смешения для дальнейшего обезвоживания
	Выходящие	Сливная вода	3090	В верхний канал аэротенков
	Входящие	Уплотненный ил, влажность 95–96 %	635	
Бак смешения осадка	Входящие	Сырой осадок	305	
		Сульфат алюминия	0,9	
	Выходящие	Исходный осадок (смесь сырого осадка и избыточного ила с коагулянтom), влажность 95–96 %	941	На центрифуги для обезвоживания
Центрифуги	Входящие	Исходный осадок	941	
	Входящие	Флокулянт	66,2	
	Выходящие	Обезвоженный осадок (кек), влажность 73–76 %	163	На сжигание
	Выходящие	Фугат	778	В верхний канал аэротенков
Завод сжигания осадка	Входящие	Обезвоженный осадок (кек), влажность 73–76 %	163	
	Входящие	Привозной обезвоженный осадок, влажность 72–75 %	19,1	
	Выходящие	Едкий натр	0,71	
		Известняк	0,32	
	Выходящие	Зола	14,3	На полигон складирования осадка
		Сбросная вода	24	В голову сооружений
Выходящие	Водяной пар при $t = 20^{\circ}\text{C}$	144,8		
Входящие	Охлаждение, промывка трубопроводов, персонал	11 126,03		
Техническая и водопроводная вода	Выходящие	Охлаждение, промывка трубопроводов, персонал	11 126,03	В голову сооружений



Процесс очистки сточных вод и принципы распределения потоков по очистным сооружениям, а также сокращение загрязнения сточных вод в ходе очистки по БПК<sub>5</sub>, фосфору и азоту представлены на рисунке 24.

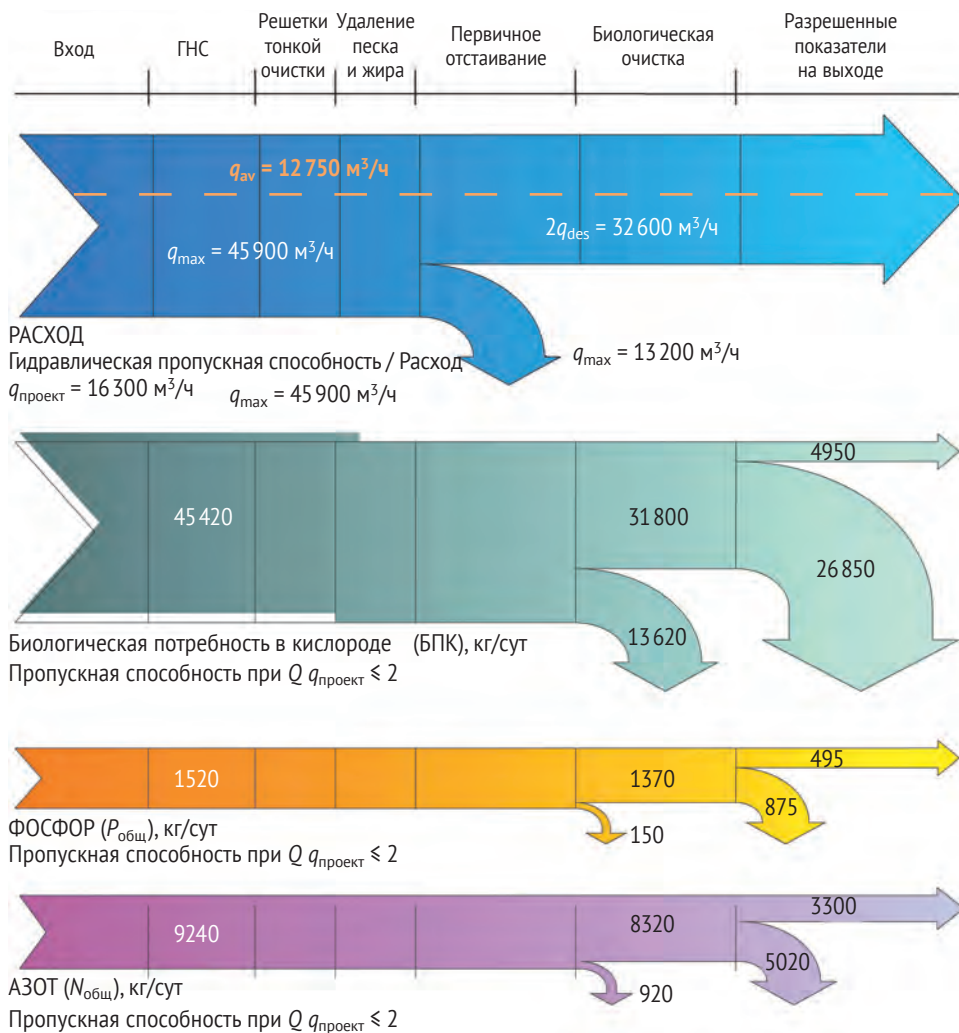


Рис. 24. Массовый баланс удаления органических веществ и биогенов (на примере Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга)

Сброс веществ в водный объект после очистки сточных вод может существенно различаться в зависимости от объекта, осуществляющего сброс. В таблице 9 приведены данные по веществам, характерным для сброса централизованных систем водоотведения городов и поселений (ЦСВП) с кратким описанием каждого компонента сброса, а в таблице 10 — данные для наиболее распространенных реагентов, используемых при различных методах очистки сточных вод.

Таблица 9. Сброс веществ в водный объект (ЦСВП)

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
1	Биологическое потребление кислорода (Biochemical Oxygen Demand)	Основной процесс	Очистка сточных вод	Эмиссия (сбросы)	10-26-4	–	–
2	Взвешенные вещества (solids, nonvolatile suspended)	Основной процесс	Очистка сточных вод	Эмиссия (сбросы)	11-06-3	Твердое	–

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы				Краткое описание опасности и основные характеристики
В воздухе рабочей зоны		Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения		
ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	ПДК, мг/дм <sup>3</sup> (высшая, I, II категория)	Класс опасности	
–	–	(3 лето, 6 зима; 3 лето, 4 зима)	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Как правило, в течение пяти суток при нормальных условиях происходит окисление ~ 70% легкоокисляющихся органических веществ. Практически полное окисление (БПК<sub>полн</sub> или БПК<sub>20</sub>) достигается в течение 20 сут.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Является параметром качества воды питьевого и технического назначения. Вызывает изменение органолептических свойств воды.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>БПК является одним из важнейших критериев уровня загрязнения водоема органическими веществами, определяет количество легкоокисляющихся органических загрязняющих веществ в воде</p>
–	–	(0,25; 0,75)	–	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Опасность взвешенных веществ зависит от химического и гранулометрического состава.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Загрязняющие вещества и патогенные микроорганизмы переносятся на поверхности частиц. Чем меньше размер частиц, тем больше общая площадь поверхности на единицу массы частиц в граммах.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Вызывают нарушение функций в органах дыхания водной флоры и фауны; снижают прозрачность воды и интенсивность фотосинтеза; нарушают условия питания организмов. Оседая на дно, образуют отложения, препятствующие нормальному развитию бентоса и корневой системы растений. Отложение взвесей на нерестилищах ведет к потере нерестовых участков</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
3	Азот аммонийный (Ammonium)	Основной процесс	Очистка сточных вод	Эмиссия (сбросы)	14798-03-9		–
4	Азот нитратов (Nitrate)	Основной процесс	Очистка сточных вод	Эмиссия (сбросы)	14797-55-8 (231-554-3)		–

Таблица 9 (продолжение)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы				Краткое описание опасности и основные характеристики
В воздухе рабочей зоны		Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения		
ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	ПДК, мг/дм <sup>3</sup> (высшая, I, II категория)	Класс опасности	
–	–	0,5 (в пересчете на азот 0,4); 2,9 для морской воды при 13–34 %	4	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Ухудшает органолептические характеристики воды.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Вызывает денатурацию белков в организме; нарушает дыхание клеток и тканей; вызывает поражение центральной нервной системы, органов дыхания и пищеварительной системы. Известны случаи развития онкологических заболеваний.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Ухудшает газовый и гидрохимический состав воды, приводит к нарушению дыхания рыб, нарушает равновесие водных систем</p>
–	–	40 9 в пересчете на азот нитратов	4	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i> Нитраты восстанавливаются до нитритов, которые имеют сверхвысокую токсичность и считаются в 30 раз более опасными, чем нитраты.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i> Нарушается координация движений, наблюдаются одышка, сердцебиение, слепота, увеличение печени, симптомы отравления и пр. Большие концентрации нитратов вызывают токсический цианоз (метгемоглобинемию) у детей.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i> Ведет к эвтрофикации водоема, накапливается в телах рыб</p>

№ п/п	Наименование химического вещества	Основной/вспомогательный процесс образования	Процесс/установка	Назначение	Сведения о веществе		
					Номер CAS	Агрегатное состояние	Молекулярная формула
5	Фосфор фосфатов (Phosphate)	Основной процесс	Очистка сточных вод	Эмиссия (сбросы)	14265-44-2		–

Таблица 9 (окончание)

Сведения о веществе				
Гигиенические нормативы				Краткое описание опасности и основные характеристики
В воздухе рабочей зоны		Нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения		
ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	ПДК, мг/дм <sup>3</sup> (высшая, I, II категория)	Класс опасности	
–	–	0,05 (по Р) – олиготрофные, 0,15 (по Р) – мезотрофные, 0,2 (по Р) – эвтрофные водоемы	4Э	<p><i>Опасность, обусловленная физико-химическими свойствами</i></p> <p>Сопровождается резким нарушением в равновесии различных видов флоры и фауны в водоеме.</p> <p><i>Воздействие на организм человека</i></p> <p>Дерматологические заболевания, поражаются мышцы, печень, почки. Вызывает резкое усиление секреции желез (слюнных, бронхиальных рецепторов, потовых желез), резкое падение артериального давления и пульса, судороги периферических мышц, нейротоксичен.</p> <p><i>Воздействие на окружающую среду</i></p> <p>Ведет к эвтрофикации водоема, провоцирует появление в воде цианобактерий, которые в процессе жизнедеятельности производят токсины, опасные для людей и животных, а также приводит к недостатку кислорода, что вызывает гибель рыб</p>

Таблица 10. Сведения о химических веществах, присутствующих в среде на стадии очистки сточных вод

Наименование вещества (соединения)	Наименование процесса	Регистрационный номер CAS	Агрегатное состояние	Формула	ПДК в атмосферном воздухе населенных мест, мг/м <sup>3</sup> / ПДК в воде, мг/дм <sup>3</sup> (мг/л)
Хлор	Обеззараживание	7782-50-5	В свободном состоянии — газ	Cl <sub>2</sub>	ПДК м. р. — 0,1 мг/м <sup>3</sup> ; ПДК с. с. — 0,03 мг/м <sup>3</sup>
Натрия гипохлорит	Обеззараживание	7681-52-9	Твердое вещество	NaOCl	—
Натрия тиосульфат	Дехлорирование	7772-98-7	Твердое вещество	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—
Силикагель	Физико-химическая очистка	7631-86-9	Твердое вещество	nSiO <sub>2</sub> · mH <sub>2</sub> O	—
Алюмогель	Физико-химическая очистка	1344-28-1	Вязкий коллоидный гель	[Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · nH <sub>2</sub> O] · nH <sub>2</sub> O	—
Активированный уголь	Физико-химическая очистка	7440-44-0	Твердое вещество	C	ПДК м. р. — 0,3 мг/м <sup>3</sup>
Крахмал	Физико-химическая очистка	9005-25-8	Твердое вещество	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	—
Декстрин	Физико-химическая очистка	9004-53-9	Твердое вещество	(C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>5</sub> ) <sub>n</sub>	—
Альгинат натрия	Физико-химическая очистка	9005-38-3	Твердое вещество	(C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> O <sub>6</sub> Na) <sub>n</sub>	—



ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Краткое описание, основные характеристики
1	2	Простое вещество хлор – ядовитый удушающий двухатомный газ желтовато-зеленого цвета, тяжелее воздуха, с резким запахом и сладковатым вкусом. Обладает антисептическим и отбеливающими свойствами
–	2	Твердое гигроскопичное соединение с резким запахом. Сильный окислитель, обладает выраженными антисептическими и дезинфицирующими свойствами. Применяется в медицине в качестве бактерицидного и стерилизующего средства, а также в пищевой промышленности и сельском хозяйстве. Пероральная токсичность соединения: – мыши, LD <sub>50</sub> – 5800 мг/кг; – человек, TD <sub>Lo</sub> – 1000 мг/кг
10	4	Твердое бесцветное гигроскопичное соединение. Используется для удаления следов хлора
–	3	Высушенный гель, образующийся из перенасыщенных растворов кремниевых кислот ( $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ ) при pH > 5–6. Адсорбент
–	4–5	Представляет собой полупрозрачный вязкий коллоидный гель. Адсорбент
ПДК угольной пыли – 10	4	Пористый материал, производимый из древесного угля, кокса из каменного угля или нефти, скорлупы кокосовых орехов и других углеродосодержащих материалов. Адсорбент
–	4	Белый порошок, органическое вещество, смесь полисахаридов. Флокулянт
–	4	Белый порошок, олигосахарид, получаемый термической обработкой картофельного или кукурузного крахмала. Флокулянт
–	5	Белый порошок, органическая натриевая соль альгиновой кислоты. Флокулянт

Наименование вещества (соединения)	Наименование процесса	Регистрационный номер CAS	Агрегатное состояние	Формула	ПДК в атмосферном воздухе населенных мест, мг/м <sup>3</sup> / ПДК в воде, мг/дм <sup>3</sup> (мг/л)
Алюминия сульфат	Физико-химическая очистка	10043-01-3	Твердое вещество	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	–
Песок	Пескоулавливание	7631-86-9	Твердое вещество	SiO <sub>2</sub>	ПДК хоз.-быт. – 10 мг/дм <sup>3</sup> (по кремнию); ПДК м. р. – 0,02 мг/дм <sup>3</sup>
Хлорная известь	Обеззараживание отбросов	22464-76-2	Твердое вещество	CaOCl <sub>2</sub>	–
Азот	Загрязнитель	7727-37-9	В свободном состоянии – газ	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	ПДК рыб. хоз. по азоту нитратов – 0,39 мг/л
Фосфор	Загрязнитель	7723-14-0	В свободном состоянии – твердое вещество	P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	ПДК м. р. – 0,0005 мг/м <sup>3</sup> (для желтого фосфора), ПДК рыб.-хоз. по общему фосфору и фосфору ортофосфатов – от 0,05 до 0,2 мг/л; ПДК в питьевой воде – 0,0001 мг/л

Таблица 10 (окончание)

ПДК в воздухе рабочей зоны, мг/м <sup>3</sup>	Класс опасности	Краткое описание, основные характеристики
0,5	3	Бесцветные кристаллы, легко образуются кристаллогидраты с различным содержанием воды. Малотоксичен. Коагулянт
3	3	Бесцветные кристаллы, обладающие высокой твердостью и прочностью, основной компонент почти всех земных горных пород. Инертен. Токсичен в виде наночастиц (E551, аэросил), суточная доза для человека — 1 мг/кг; LD <sub>50</sub> — 3500 мг/кг
–	3	Порошок белого цвета, представляющий собой смесь нескольких соединений: гипохлорида кальция Ca(ClO) <sub>2</sub> , хлорида кальция CaCl <sub>2</sub> и гидроксида кальция (гашеной извести) Ca(OH) <sub>2</sub> , а также кристаллизационной воды. Эту смесь часто называют просто «хлоркой», иногда белильной известью. Формулу можно записать так: Ca(OCl) <sub>2</sub> ·CaCl <sub>2</sub> ·Ca(OH) <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O, или в более удобном виде: 3Ca(OH) <sub>2</sub> ·2Cl <sub>2</sub> . Выпускается в виде порошка белого или серого цвета, с резким запахом. Вещество нестойкое, хороший окислитель, антисептик. LD = 850 мг/кг
–	3	Молекулярный азот (N <sub>2</sub> ) — газ без цвета, вкуса и запаха, основной компонент воздуха (78 об. %). Химически инертен. При повышенном атмосферном давлении способен вызывать азотное отравление. Большинство соединений азота представляют серьезную опасность для здоровья
0,03 (для желтого фосфора)	1 (фосфор желтый элементарный)	Для фосфора традиционно различают три аллотропные модификации: белый, красный и черный. Неочищенный белый фосфор обычно называют «желтый фосфор», это чрезвычайно ядовитое, огнеопасное вещество. Черный фосфор — наиболее стабильная термодинамически и химически наименее активная форма элементарного фосфора. Горючесть фосфора очень велика и зависит от аллотропической модификации. Красный фосфор практически нетоксичен, белый — ядовит

## ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ

*Механическая очистка*

В городские коллекторы сточных вод, особенно в случае общесплавных сетей канализации, попадают самые разнообразные материалы, различающиеся по своей природе, форме и состоянию.

Задачи механической очистки:

- удалить из сточных вод примеси, которые возможно извлечь механическими методами (крупные загрязнения и взвешенные вещества);
- отделить и удалить переносимые исходной водой объемные вещества, способные снижать эффективность обработки воды и осадков или затруднять работу и эксплуатацию соответствующего оборудования;
- защитить остальные очистные сооружения от попадания в них крупных предметов, способных вызвать забивание соединительных трубопроводов и различных установок.

Выделение плавающих грубых примесей (процеживание) необходимо для обеспечения нормальной работы сооружений и оборудования, для предотвращения аварий. Удаление отбросов также (частично) задерживает те плавающие включения, которые могут попадать в водные объекты с очищенной водой, не задержанные на основных стадиях очистки.

В состав сооружений механической очистки городских сточных вод входят решетки, песколовки и первичные отстойники. Решетки и песколовки (или комбинированные установки, представляющие собой решетки-песколовки) устанавливаются в обязательном порядке на всех очистных сооружениях, принимающих городские сточные воды. Вопрос применения или неприменения первичных отстойников решается индивидуально для каждого проекта в зависимости от производительности очистных сооружений, осуществляемых биохимических процессов и наличия органических соединений в исходной сточной воде для используемых технологий биологической очистки<sup>100</sup>.

Решетки служат для задержания крупных загрязнений органического и минерального происхождения и подготавливают сточную воду к дальнейшей очистке. В составе очистных сооружений после канализационной насосной станции должны предусматриваться решетки с прозорами не более 16 мм и скоростью движения сточных вод в прозорах решетки не более 1 м/с.

На первом этапе проводится процеживание сточных вод как через решетки грубой очистки (размер прозоров — до 6 мм), так и через решетки (сита) тонкой очистки (размеры прозоров от 0,5 до 3,0 мм), где примеси удаляются для утилизации или переработки. Если примеси очень грубые, процеживание дополняется измельчением дробилками-измельчителями. Также используется оборудование для прессования отходов и промывания решеток; применяется фракционирование, позволяющее разделить примеси по размерам.

<sup>100</sup> Гудков А. Г. Механическая очистка сточных вод : учеб. пособие. — Вологда, 2003.

Второй и третий этапы — основанное на гравитационном выделении взвешенных веществ отстаивание. В процессе движения потока сточной воды тяжелые частицы под действием силы тяжести оседают на дно сооружения. К данным сооружениям относятся песколовки и первичные отстойники<sup>101</sup>.

#### *Решетки (процеживание)*

Различные механические включения в поступающих на очистку или перекачку сточных водах вызывают необходимость использования решеток для грубой и тонкой очистки. Грубые включения могут затруднять или даже делать невозможной обработку сточных вод и работу последующих сооружений и оборудования. Для удаления этих компонентов используются сооружения механической очистки, где решетки играют важную роль. В основном они используются при обработке городских сточных вод.

Характеристики отбросов чрезвычайно варьируют в зависимости от источников загрязнений, типа системы канализации (комбинированная, полураздельная или раздельная), а также от природы производственных сточных вод (включая их предварительную обработку до сброса в канализацию).

Решетки различаются по конструктивным особенностям и могут быть классифицированы на несколько типов. Разделение на грубую или тонкую очистку зависит от ширины прозоров, через которые проходят не задержанные решеткой отходы. Решетки тонкой очистки обычно устанавливаются после решеток грубой очистки для дополнительного удаления более мелких частиц.

Решетки для ручной чистки (рис. 25) изготавливаются из прямых прутьев круглого или прямоугольного сечения и могут быть установлены вертикально или под наклоном (под углом 60–80° к горизонтали), чтобы облегчить удаление задержанных отходов. Они могут быть подвижными (на направляющих) или поворотными, что позволяет очищать и канал после решетки (если этот канал закрыт)<sup>102</sup>.

Вместо решеток на станциях перекачки сточных вод часто используют перфорированные подъемные корзины (корзины-решетки), которые не требуют прямого доступа. Уход и очистка таких решеток вызывает значительные трудности. На данный момент такой вид решеток представлен на сооружениях небольшой производительности с малой степенью автоматизации и построенных более 20–30 лет назад или на канализационных станциях небольшой производительности.

Рабочая зона решетки обычно формируется прутьями прямоугольного или трапецеидального сечения (снижающего опасность заклинивания твердыми материалами), имеющими острые или скругленные углы, а также с помощью формирования перфорированного листа. Такие решетки используются как для тонкого сороудаления, так и для более грубого удаления включений.

<sup>101</sup> Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М. : АКВАРОС, 2003.

<sup>102</sup> Технический справочник по обработке воды : в 2 т. — Т. 2. — СПб. : Новый журнал, 2017.



Рис. 25. Решетки с ручной чисткой

Существует несколько типов подобных решеток, в основном применяются плоские и изогнутые<sup>105</sup>.

Преимущество изогнутых решеток (рис. 26) типа ОС с прозором 10–25 мм состоит в том, что они имеют высокое значение полезного сечения прохода и простую механическую конструкцию.

---

<sup>105</sup> Василенко Л. В. и др. Методы очистки промышленных сточных вод : учеб. пособие. — Екатеринбург, 2009.

Чистка поля решетки проводится с помощью четырех скребков, имеющих зубчатую форму и установленных на конце вращающегося вокруг горизонтальной оси вала. Для избежания застревания в решетке полезно устанавливать перед ней специальные камнеловушки. Решетки этого типа наилучшим образом подходят для сооружений средней мощности при условии, что обрабатываемая ими вода не слишком загрязнена, а высота подъема удержанных отбросов невелика.



Рис. 26. Изогнутые решетки

Плоские решетки с возвратно-поступательной очисткой, имеющие отверстия от 10 до 100 мм, обычно устанавливаются вертикально или под углом около 80° к горизонтальной плоскости. Поле решетки заканчивается чуть выше максимального уровня воды и продлено специальным настилом. Решетки очищаются скребками и гребенками, приводимыми в движение цепным механизмом с бесконечной цепью. Они поднимают удаленные отбросы, перемещаясь вдоль решетки и далее по настилу. Затем они отходят от поля решетки и возвращаются в исходное положение. Выгрузка поднятых отбросов осуществляется автоматически.

Плоские решетки с зубчато-реечным приводом, у которых скребок перемещается зубчато-реечным механизмом, отличаются особой механической прочностью и надежностью. Они могут использоваться при очень больших размерах поля решетки (свыше 10 м). Если решетки должны обрабатывать очень большие расходы (свыше 30 000 м<sup>3</sup>/ч) при заборе слабозагрязненной поверхностной воды, можно устанавливать подвижные скребки. Они обрабатывают только часть поля решетки и смещаются после каждого своего движения.

Одни из самых распространенных «плоских» решеток — грабельные (рис. 27). Грабельные решетки представляют собой набранное из стержней фильтрующее полотно, вставленное в раму. Стержни из фасонного проката имеют близкую к каплевидной форму сечения, что улучшает гидравлические характеристики фильтрующего полотна. Также фильтрующее полотно решетки может быть набрано из стержней с прямоугольной формой сечения.

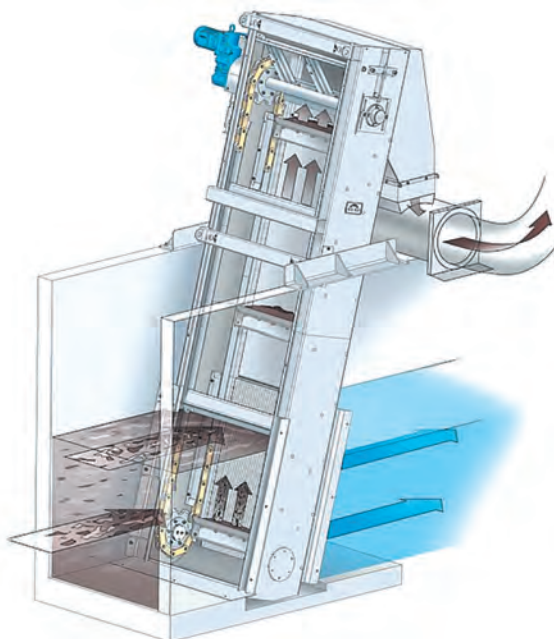


Рис. 27. Схема стержневых и грабельных решеток

На рисунке 28 изображено поле решеток с подвижным полотном, которое формируется на основе принципа «непрерывной цепи» и имеет прозоры от 3 до 15 мм. Для создания непрерывной цепи используются перфорированное полотно, зубья или крюки, установленные на осях. Поднятые отходы выгружаются в верхней задней части решетки. Процесс самоочистки завершается с помощью вращающейся щетки и напора воды в верхней части решетки.

Поле решетки (прозор — от 3 до 15 мм) образовано двумя группами параллельных пластин, причем каждая группа пластин имеет форму ступеней лестницы (рис. 29). Одна из этих групп неподвижна, а другая — может перемещаться.

Преимущество этих решеток в том, что они обеспечивают очень низкое сопротивление потоку, что делает их удобными для установки в уже существующие каналы. Принцип их функционирования основан на том, что загрязнения, находящиеся на решетке, подвижной ступенью, работающей в круговом цикле, удаляются с неподвижной ступени, перемещаются и укладываются на следующую, более высокую, неподвижную ступень — таким образом, шаг за шагом, до линии сброса загрязнений.



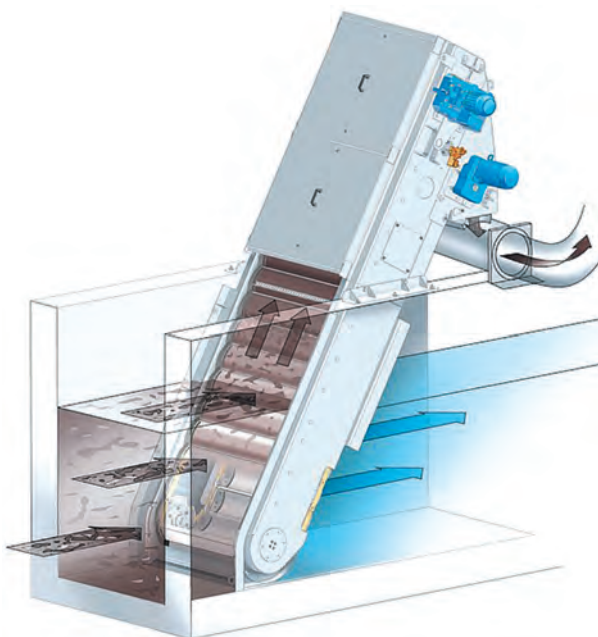


Рис. 28. Бесконечное подвижное полотно

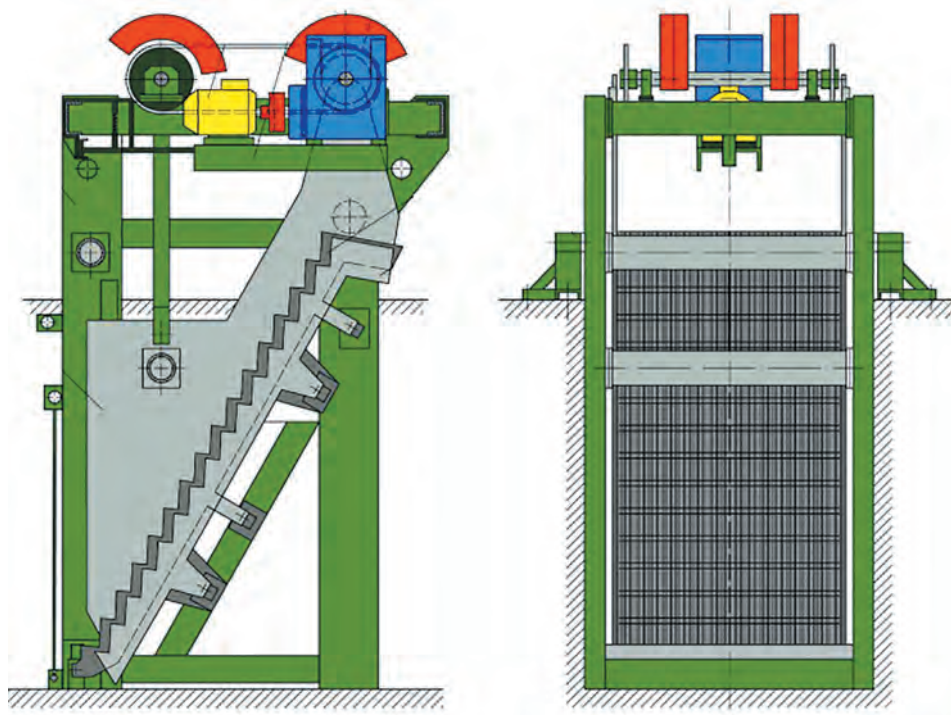


Рис. 29. Вращающиеся решетки ступенчатого типа

Благодаря поступательному движению во время цикла возможно образование «ковра» из отбросов, что в свою очередь минимизирует «прорыв» воды через решетку, который может произойти при использовании традиционной решетки.

#### Основные критерии выбора решеток

- *Забивание решеток.* Уровень, на который допустимо заполнение решетки загрязнениями (процентное соотношение свободного сечения, которое может быть забито), зависит от качества воды, а также от метода, используемого для удаления загрязнений с решетки. Если решетка очищается вручную, то площадь ее погружаемой части должна быть рассчитана с большим запасом, чтобы избежать слишком частого очищения.
- *Глубина регулировки автоматического управления.* Регулярная очистка решетки производится при помощи автоматической системы управления, которая регулирует частоту (от 1 мин до 1 ч) и продолжительность работы (от 1 до 15 мин), а также использует датчик падения напора (входного или дифференциального) или индикатор безопасности для запуска непрерывной очистки. Если решетка установлена после насосной станции, управление ее работой может быть синхронизировано с запуском насосов.
- *Контроль защиты решеток.* Автоматизированные решетки имеют ограничители усилия, которые предотвращают разрушение конструкционного материала в случае серьезного забивания, которое может вызвать избыточную нагрузку или блокировку потока. Автоматизированные решетки, которые чистятся возвратно-поступательным движением, имеют устройство, которое останавливает скребок автоматически за пределами поля решетки, чтобы предотвратить возможность заклинивания или появления аномального крутящего момента при повторном запуске.

На большинстве очистных сооружений используются механические решетки с прозорами размером 3 или 6 мм, однако в некоторых случаях также применяются сита с более мелкими отверстиями. Например, это может быть полезно на небольших очистных сооружениях для облегчения эксплуатации и обеспечения надежного режима работы оборудования или на многочисленных очистных установках, находящихся в бассейнах канализации предприятий агропродовольственной промышленности, где просеивание позволяет удалять значительную часть загрязнений.

Для сит с отверстиями до 6 мм используется несколько основных систем, например, барабаны и вращающиеся сетки или изогнутые сита. Загрязненная вода подается в барабан (рис. 30) снаружи или изнутри. Вода проходит через сетку, тогда как твердые примеси задерживаются на ней, затем увлекаются барабаном при его вращении и удаляются.

В зависимости от того, как вода подается (внутренняя или внешняя), твердые частицы могут быть удалены из системы очистки либо скребками, либо с помощью действия силы тяжести. Изогнутая форма сетки является основной характеристикой изогнутого сита, которая позволяет извлечь большую часть загрязнений в зоне промывки, удерживать и выдавливать загрязнения в других зонах сетки.

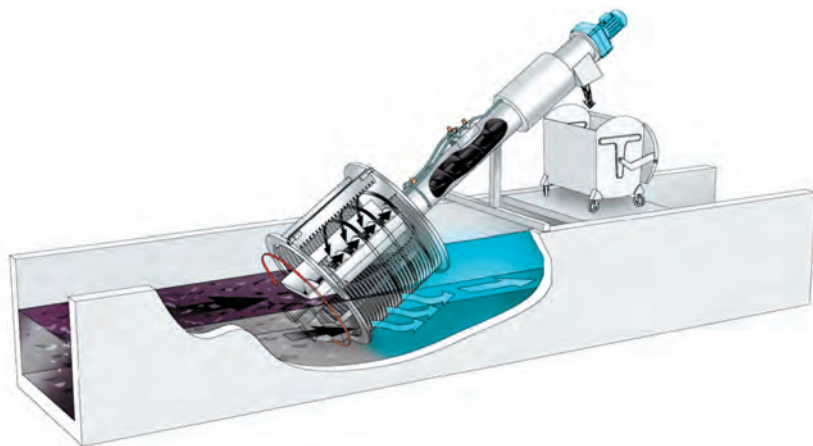


Рис. 30. Барабанные решетки

Также существуют специальные системы вибрации, которые могут использоваться для удаления задержанных твердых продуктов с поверхности сита.

Существует «виброразновидность» сит, которые больше подходят для удаления жироподобных и клейких продуктов, а также для обработки сильно-загрязненных вод.

При организации системы удаления крупных включений (процеживания) также предусматриваются системы промывки отбросов с решеток и их прессования. Принцип работы подобных устройств: отсеиваемый материал подается в начало медленно вращающегося шнека; вода для промывки добавляется в зону промывки прессования. Рабочий цикл регулируется системой управления в зависимости от состава отсева. Пресс (рис. 31) транспортирует промытый и отжатый осадок в контейнер через систему труб и спиральный транспортер.

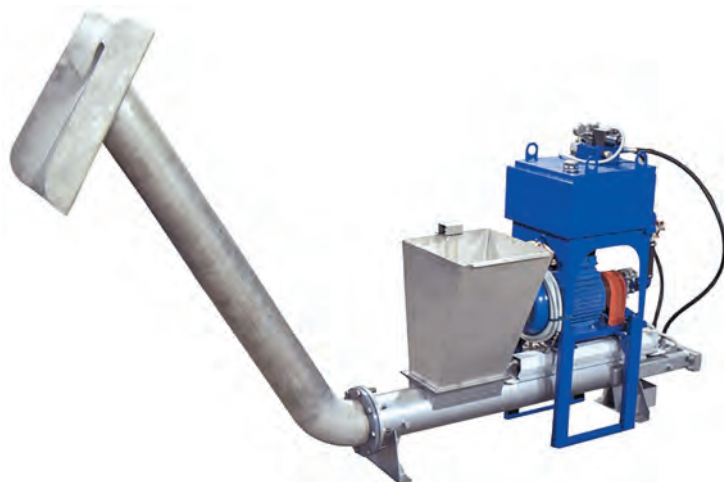


Рис. 31. Пресс и транспортер

Из-за небольшого насыпного удельного веса транспортировка отбросов с решеток (сит) обходится дороже, при этом они содержат много органических загрязнений, и размещение их на полигонах может вызвать гниение и выделение неприятных запахов. Проблема становится более заметной при использовании процеживающих устройств с меньшими размерами прозоров (ячеек). Однако обезвоживание (прессование) отбросов с предварительной промывкой помогает:

- сократить массу вывозимого отхода;
- обеспечить более высокую стабильность отхода (стойкость к загниванию);
- с промывной водой вернуть в основной процесс часть органики, необходимой для интенсификации процессов биологической очистки; для обеззараживания отбросов, как правило, используют пересыпание их хлорной известью  $\text{CaOCl}_2$ .

Перечень наиболее распространенного оборудования для отмывки и обезвоживания отбросов с решеток приведен в таблице 11.

На первом этапе обработки проводится измельчение — размельчают твердые переносимые водой вещества, чтобы они могли продвигаться к последующим стадиям обработки. Цель состоит в том, чтобы устранить все затруднения, связанные с отделением и вывозом отходов, собирающихся на решетках, ситах и сетках<sup>104</sup>.

Таблица 11. Перечень наиболее распространенного оборудования для отмывки и обезвоживания отбросов с решеток

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики
Пресс для отбросов	Обезвоживание производится в перфорированном цилиндре с помощью поршня либо шнека	Уменьшение объема отбросов до двух раз
Пресс с камерой предварительной промывки	Перед подачей на обезвоживание отбросы отмываются технической водой (перемешиванием в закрытой емкости)	Практически полная отмывка отбросов от взвешенных веществ. Более глубокое обезвоживание отбросов

В большинстве случаев для измельчения используются решетки-дробилки. Эти устройства способны задержать крупные твердые отходы (пластмассу, дерево, ветошь, песок, резину, кожу, пищевые отходы и прочий мусор) и измельчить их (рис. 32). В устройстве помещается цилиндр, который выполняет функцию задерживания отходов и перемещения их к так называемому трепальному гребню, который с помощью других элементов конструкции измельчает крупные отходы. Измельчившись и пройдя сквозь решетку, эти отходы подхватываются потоком и более не представляют угрозы для оборудования.

<sup>104</sup> Технический справочник по обработке воды...



Рис. 32. Измельчители

#### *Песколовки (пескоулавливание)*

Песколовки — сооружения, которые используются в составе блока механической очистки для выделения из сточных вод битого стекла, шлаков, песка и иных тяжелых минеральных примесей. Цель удаления песка состоит в извлечении из исходной воды гравия, песка, а также волокон и более или менее мелких минеральных частиц, чтобы предотвратить формирование отложений в каналах и трубопроводах и защитить насосы и другое оборудование от абразивного воздействия.

При разработке проектов, включающих в себя песколовки, возникают две основные проблемы.

Во-первых, песок переносится водой в основном в периоды пиковых расходов, когда скорость потока воды наиболее высока, что приводит к увеличению количества песка, переходящего в суспензию (в результате самоочистения сточных коллекторов и трубопроводов).

Во-вторых, при очистке сточных вод цель заключается в удалении максимального количества минеральных примесей с минимальным содержанием органических веществ.

Принцип работы песколовки основан на использовании гравитации таким образом, чтобы тяжелые минеральные частицы оседали, но не отделялся органический осадок. Обычно при удалении песка имеют дело с частицами

размером не менее 200–300 мкм, а более мелкие частицы удаляются на более поздних стадиях очистки. Любая песколовка состоит из двух частей: 1) рабочей; 2) осадочной. До 75 % минеральных примесей может быть удалено в эффективно работающей песколовке, где сточная вода проходит через одну часть (рабочую), а тяжелые минеральные примеси выпадают в другой (осадочной), которая периодически очищается при помощи гидроэлеватора или насоса.

Количество песка в сточных водах меняется в очень широких пределах и, в частности, зависит от следующего:

- геологических характеристик региона;
- состояния и протяженности канализационной сети;
- типа сети (раздельная, общесплавная, смешанная), а также от частоты ее технического обслуживания;
- частоты и интенсивности дождей.

Трудности, возникающие при оценке количества песка, поступающего на очистные сооружения, или при определении эффективности (порога задерживания) песколовки:

- необходимость создания значительной турбулентности при отборе проб для сохранения суспензии, образованной частицами песка размерами свыше 0,3–0,4 мм;
- использование понятия «песок» для обозначения всех зернистых частиц в материалах, задержанных комплектом сит и полученных после прокаливания пробы, вследствие чего в них входит не только собственно песок, но также частицы других минеральных веществ, часто обладающих большей или меньшей пористостью (осколки стекла, бетона, фарфора, фаянса и т. д.).

В самотечных общесплавных сетях канализации дополнительно для защиты оборудования устраиваются специальные камнеловушки, в которых задерживаются крупный песок, камни, куски стекла и металлические предметы.

Песколовки классифицируются по направлению движения жидкости:

- вертикальные;
- горизонтальные (стоки движутся прямо или по кругу);
- тангенциальные.

Вертикальная песколовка, изображенная на рисунке 33, служит для удаления из сточных вод нерастворенных минеральных примесей, таких как песок, стекло, шлак, размером от 0,2 до 10,0 мм. Она устанавливается на станциях очистки сточных вод для предотвращения попадания песка в очистные сооружения, особенно при использовании общесплавной канализации. Вертикальная песколовка имеет сопоставимую эффективность с горизонтальными пескоуловителями, но занимает меньшую площадь. Сточная вода, содержащая песок, очищенная от грубых примесей, поступает в центральный цилиндр вертикальной песколовки, где происходит частичное снижение скорости и успокоение натекающей воды. По мере движения воды по центральному

цилиндру в нижнюю часть песколовки скорость течения снижается до такой степени, что зерна песка, находящиеся в воде, начинают осаждаться в пространстве аккумуляции песка. Освобожденная от песка вода поднимается через внешнее затрубное пространство к гребню водослива и стекает в канализацию.

Собранный в аккумулялирующем пространстве песок после его пневматического взрыхления с помощью среднепузырчатого аэрационного элемента откачивается эрлифтом на песковые площадки.

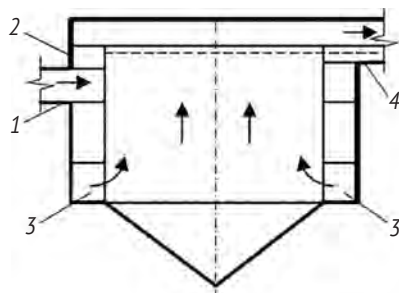


Рис. 33. Схема вертикальной песколовки:  
1 – подводный канал; 2 – сборный кольцевой лоток;  
3 – вводы воды в рабочую зону; 4 – отводной канал

Данный тип является наиболее простым в конструктивном плане.

Горизонтальная песколовка (рис. 34) состоит из двух частей: проточной (где происходит движение воды) и осадочной (где скапливается песок). Осадочная часть чаще размещается в начале песколовки, потому что процесс осаждения частичек проходит наиболее интенсивно в первые секунды очистки.

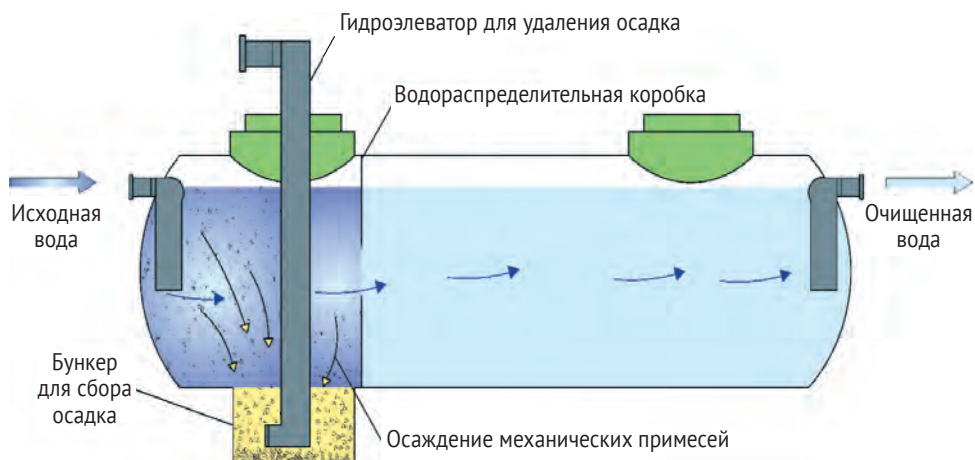


Рис. 34. Схема горизонтальной песколовки

Возможны варианты применения горизонтальных песколовок цилиндрической формы с круговым движением воды. Горизонтальная песколовка с круговым движением воды имеет отстойную часть в виде круглого желоба. Отстойная часть располагается посередине песколовки, подвод сточной воды осуществляется с одной стороны<sup>105</sup>.

Тангенциальные песколовки (рис. 35) имеют цилиндроконическую конфигурацию, диаметр — от 3 до 8 м, высоту уровня жидкости — от 3 до 5 м.

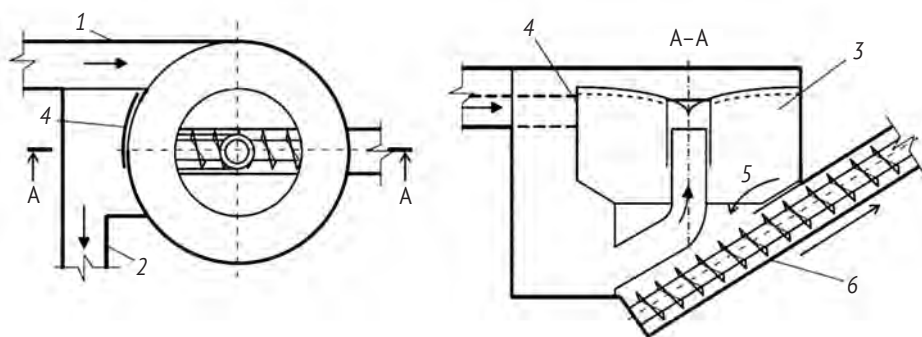


Рис. 35. Схема тангенциальной песколовки:

1 — подводящий канал; 2 — отводящий канал; 3 — рабочая часть; 4 — регулируемый водослив; 5 — песок; 6 — шнековый подъемник

Исходные стоки по касательной (тангенциально) поступают в корпус песколовки через входной патрубок, расположенный в цилиндрической части. Тангенциальная подача воды и круглое сечение корпуса создают вращательное движение потока. Песок оседает на более-менее наклонное днище и естественным путем перемещается вниз, попадая в центральный приемный бункер, где накапливается и откуда затем выгружается. Скорость смыва днища поддерживается относительно постоянной, превышающей 0,3 м/с, под действием вихревого эффекта, возникающего в результате тангенциальной подачи воды. Отделенный песок извлекают с помощью насоса или эрлифта и направляют в камеру гравитационного сцеживания или в систему механической рекуперации.

Аэрируемые прямоугольные песколовки (рис. 36), ширина которых может обычно достигать до 4 м (простое сооружение) или до 8 м (сдвоенное сооружение), имеют глубину около 4 м при максимальной длине около 30 м. Форма дна определяется системой удаления извлекаемого песка. Вода подается через камеру, расположенную ниже уровня воды в одном конце песколовки, и уходит с противоположной стороны через верхний перелив; часто вывод осуществляется через водослив, с помощью которого можно регулировать уровень воды.

<sup>105</sup> Зуева С. Б. и др. Экозащитные технологии систем водоотведения предприятий пищевой промышленности : учеб. пособие. — СПб. : Проспект Науки, 2018.



Песколовка с продольным потоком воды оснащена на всей протяженности системой продувки воздуха с помощью воздушных диффузоров, которые обеспечивают удельную мощность аэрирования  $15\text{--}30 \text{ Вт/м}^3$ , уровень жидкости может поддерживаться практически постоянным. Вводимый воздух сообщает жидкости вращательное поперечное движение и способствует, благодаря эффекту турбулентности, отделению органических веществ, приставших к частицам песка, а также позволяет частично удалять плавающие вещества (в том числе застывшие жиры).

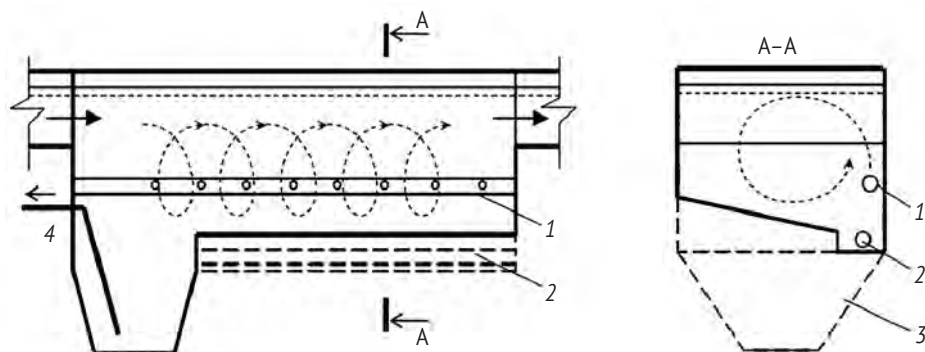


Рис. 36. Схема аэрируемой песколовки:

1 – перфорированный аэратор; 2 – трубопровод гидросмыва осадка;  
3 – осадочная часть; 4 – гидроэлеватор

Извлечение песка производится автоматически с применением различных технических средств:

- набора эрлифтов периодического действия (сбор продукта в нижнем бункере);
- мостовых скребков (сдвигающих донные отложения в приямок с последующим извлечением насосом или неподвижным эрлифтом);
- отсасывающего насоса или эрлифта, установленного на подвижном мостике.

Песок, задерживаемый в песколовках, содержит до 30–80% органических включений. Для его отмывки применяют шнековые и гидроциклонные устройства, которые позволяют сократить содержание органических веществ до 1–3%. Это уровень, который допускается международными нормами. Эксплуатационное преимущество помимо значительного снижения объема песка и предотвращения процессов гниения органики при складировании песка на песковых площадках заключается в снижении затрат по его транспортировке.

Очень часто сепараторы песка (рис. 37) представляют собой альтернативные варианты песколовки небольшой производительности.

Основными техническими характеристиками при выборе данного типа оборудования являются пропускная способность устройства по песчаной пульпе и эффективность отделения песка при заданном размере частиц.



Рис. 37. Система отмыва песка

Для отмывки песка от органических примесей используют также гидроциклонные установки, в которых подача песчаной пульпы в гидроциклон непосредственно из песколовки производится через верхний впускной патрубок. Отделение легких органических частиц от песка происходит за счет создания вихревого движения в конусообразной камере. Смытые органические загрязнения выводятся через патрубок в верхней части резервуара отстаивания, а частицы песка опускаются вниз. Центробежное ускорение в аппаратах самых малых габаритов может превышать 600 g, а давление подачи воды может изменяться в пределах от 0,5 до 2,0 бар.

*Извлечение жиров перед сбросом сточных вод в канализацию.* Извлечение жиров «на месте появления» сточных вод рекомендуется, а часто и предписывается для многих непромышленных предприятий, ресторанов, мелких населенных пунктов и т. п., так как концентрация жиров при сбросе в ЦСВ согласно требованию постановления Правительства РФ<sup>106</sup> должна составлять не более 50 мг/дм<sup>3</sup>.

Для улавливания жира и масел в схему очистки сточных вод включаются жиroleвки, представляющие собой горизонтальные емкости, имеющие в начале и в конце полупогружные перегородки для задержания жира, сбор и откачка которого производится через трубы.

<sup>106</sup> Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 г. № 644 «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ».

Стандартные сепараторы (или жироловки) производятся серийно для расходов до 20–30 л/с. Они рассчитаны на время пребывания сточных вод от 3 до 5 мин и скорость восходящего потока около 15 м/ч. При правильной эксплуатации эти аппараты могут задерживать до 80% застывших жиров и накапливать до 40 л легких продуктов на 1 л/с поступающего потока. Сепараторы требуют регулярной чистки от плавающих загрязнений, а температура воды должна быть ниже 30° С.

Конструкция аппаратов призвана предотвратить осаждение тяжелых веществ, однако в некоторых ситуациях полезно предварительно очищать сточные воды в резервуаре-отстойнике, который способен отделить наиболее крупные загрязнения за время от 1 до 3 мин.

Для сточных вод некоторых предприятий аграрно-пищевой промышленности, содержащих значительные количества жиров, подлежащих удалению (особенно это касается предприятий переработки мяса), рекомендуется установка отдельной жироловки (рис. 38), рассчитанной на гидравлическую нагрузку от 10 до 20 м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> полезной площади. При размещении перед сбросом сточных вод в канализацию этот аппарат защищает канализационную сеть от попадания в нее жиров.

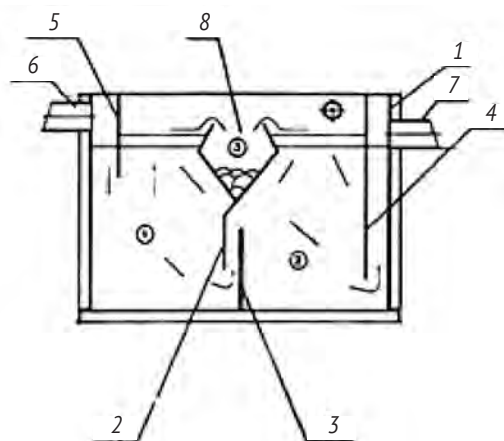


Рис. 38. Схема жироловки:

1 — корпус жиролоуловителя; 2–4 — погружные перегородки; 5 — полупогружная перегородка; 6 — подводный патрубок с уплотнительным кольцом; 7 — отводящий патрубок с уплотнительным кольцом; 8 — пространство для накопления жира

*Извлечение жиров при предварительной обработке на сооружениях очистки сточных вод.* Первичный отстойник хорошо отделяет жир, скапливающийся на поверхности воды, однако он, как правило, плохо приспособлен для отвода значительных объемов жира, что вызывает значительные эксплуатационные трудности.

Если первичное отстаивание бытовых стоков не предусматривается, их обязательно следует подвергать обработке в жироловке, причем ее предпочтительно

осуществлять в сочетании с удалением песка (при условии, что сооружение надлежащим образом рассчитано (время пребывания — около 15 мин) и оснащено средствами для удаления органических веществ, оседающих вместе с песком).

Жиры не предназначены для удаления масел и углеводов<sup>107</sup>, которые в случае их присутствия задерживаются на стадии<sup>108</sup> первичного отстаивания или в песколовках<sup>109</sup>.

### *Первичные отстойники*

Первая по движению сточной жидкости — стадия очистки, оказывающая существенное воздействие на ее загрязненность, поэтому носит также название первичной очистки либо первичного отстаивания (в противопоставление илоотделению после биологической очистки с использованием отстойников, именуемому вторичным отстаиванием). В первичных отстойниках задерживается 50–70 % всех содержащихся в сточных водах нерастворенных примесей.

Сооружения предварительной механической очистки относятся к наиболее интенсивно выделяющим выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух, особенно в тех случаях, когда вода на очистных сооружениях подается с помощью напорной перекачки. Начиная с приемной камеры, давление в жидкости снижается, и происходит интенсивное выделение растворенных в сточных водах летучих веществ в воздух.

Современные технологические схемы осветления сточных вод направлены на извлечение наибольшего количества взвешенных загрязнений, чтобы уменьшить нагрузку на стадию биологической очистки. Это приводит к уменьшению объема образующихся осадков и сокращению затрат на электроэнергию до 30–50 % для всего процесса очистки. Отделение взвешенных органических веществ до биологической очистки и их последующая конверсия в биогаз методом метанового сбраживания являются основой процессов энергогенерации на очистных сооружениях городских сточных вод.

На новых или реконструированных объектах, где использованы технологии удаления азота и фосфора, место первичного отстаивания (осветления) в технологической схеме и требования к нему изменяются по сравнению с обычной биологической очисткой (с удалением органических соединений).

Высокая эффективность удаления взвешенных веществ, и соответственно части БПК, может привести к недостаточному органическому питанию бактерий-денитрификаторов, реализующих процесс удаления азота. Первичная очистка не применяется при использовании технологии удаления от биогенных элементов сточных вод, имеющих низкое соотношение органических веществ к азоту (и к фосфору, если реализуется его биоудаление).

<sup>107</sup> Технический справочник по обработке воды... Т. 2.

<sup>108</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. — 2019.

<sup>109</sup> Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками.

На базе первичных отстойников может быть реализована технология повышения концентрации легкоокисляемых органических соединений в сточных водах для повышения эффективности процесса биологического удаления фосфора. Для этого процесс отстаивания в первичных отстойниках проводят с рециркуляцией осадка, что приводит к развитию процессов ацидофикации с выделением летучих жирных кислот, которые необходимы для роста бактерий, способных накапливать фосфор и реализующих на очистных сооружениях процесс биологического удаления фосфора.

Первичное осветление является основой технологии физико-химической очистки, которая используется в тех случаях, когда биологическая очистка по объективным причинам неприменима. Использование коагулянтов позволяет достичь глубокого удаления взвешенных веществ и очистки по БПК<sub>5</sub> до 80 %.

В вертикальных (статических цилиндрикоконических) отстойниках (рис. 39) обрабатываемая вода течет практически вертикально. Их применяют на станциях с небольшим расходом, особенно при физико-химической очистке промышленных сточных вод; также используют на более крупных станциях, если объем подлежащего отделению осадка незначителен, а его плотность велика. Поскольку угол наклона стенки конической части аппарата в зависимости от природы осадка должен составлять от 45 до 65°, диаметр отстойника ограничивается 6–7 м.

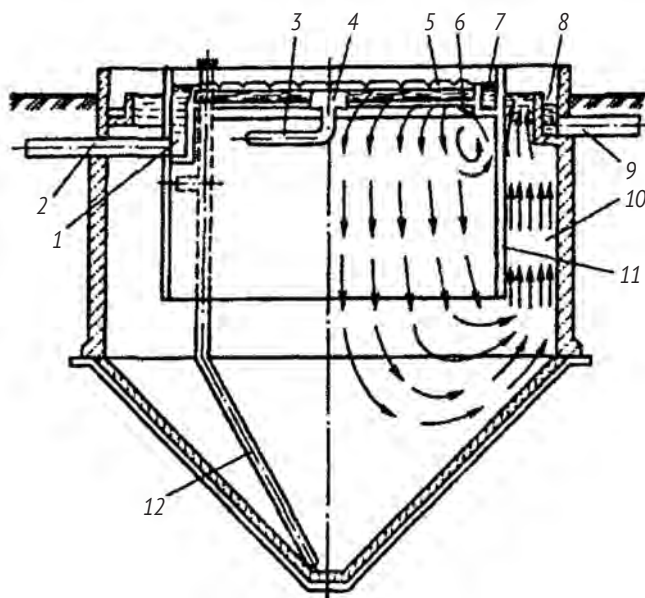


Рис. 39. Вертикальный отстойник:

1 — приемная камера; 2 — подающий трубопровод; 3, 4 — трубопровод и воронка для удаления плавающих веществ соответственно; 5 — зубчатый распределительный водослив; 6 — отражательный козырек; 7 — распределительный лоток; 8 — периферийный сборный лоток осветленной воды; 9 — отводящий трубопровод; 10 — кольцевая зона восходящего движения; 11 — кольцевая перегородка; 12 — трубопровод для выпуска осадка

В зависимости от массы удаляемого осадка используется тот или иной тип радиального отстойника (рис. 40) со скребковым механизмом. Такие сооружения различаются конструкцией донного скребка (сплошной одиночный скребок или несколько скребков, расположенных в форме «жалюзи») и передвижного мостика, несущего скребковый механизм (радиальный, оснащенный противолежащими консолями или без таковых, либо диаметральный), причем привод мостика может быть как периферийным, так и центральным<sup>110</sup>.

Рекомендуемая средняя скорость отстаивания составляет 1,5–2,0 м/ч, максимальная скорость при пиковых нагрузках — 4 м/ч. В данном случае не требуется добиваться максимального удаления взвешенных веществ, определяющих величину БПК, что часто необходимо для проведения последующих процессов биологической очистки.

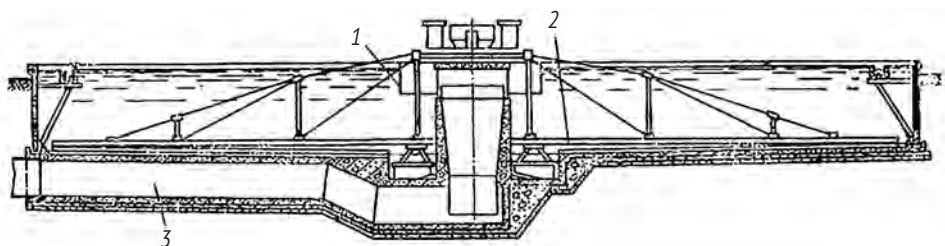


Рис. 40. Радиальный отстойник:

- 1 – полупогруженный кожух распределительного устройства; 2 – илоскреб;  
3 – подводящая труба

В особо крупных отстойниках и при обработке сильно загрязненных сточных вод применяются также системы центрального привода, редукторные двигатели которых установлены на оси резервуара:

- горизонтальные;
- с тонкослойными модулями.

Горизонтальные отстойники (рис. 41) представляют собой резервуар с горизонтальным потоком обрабатываемой воды. На резервуаре установлен мостовой скребковый механизм, который перемещает осадок в приемную яму, находящуюся в начале отстойника. Уклон днища такого сооружения может быть выше 1%.

При такой конструкции отстойника очень важно обеспечить надлежащее распределение обрабатываемой воды по всей ширине. Для этого оборудуют специальный канал с водосливами или отверстиями, расположенными ниже уровня воды (распределение воды должно оставаться равномерным в широком диапазоне значений расхода). По мере перемещения воды к выходу из отстойника вещества, способные к седиментации, оседают на его дно. На выходе из отстойника осветленная вода переливается в один или несколько сборных лотков.

<sup>110</sup> Процессы, аппараты и техника защиты окружающей среды. — Ч. I: Очистка промышленных сточных вод : учеб. пособие / В. И. Легкий, И. Н. Липунов, А. Ф. Никифоров, И. Г. Первова. — Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016.

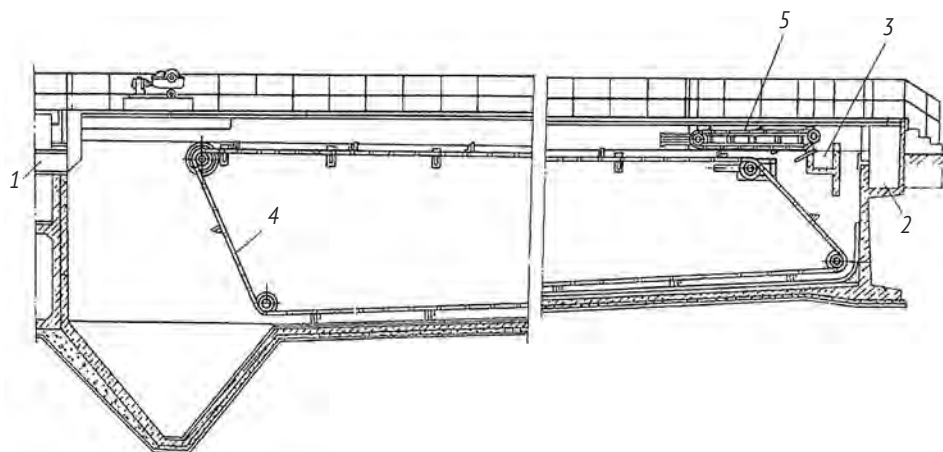


Рис. 41. Горизонтальный отстойник:

1 — подача сточных вод; 2 — сборный лоток для удаления сточных вод; 3 — лоток для удаления плавающих веществ; 4 — бесконечная цепь со скребками; 5 — транспортер для удаления плавающих веществ в лоток

Мостовой скребковый механизм перемещается вдоль стенок отстойника, совершает возвратно-поступательное движение. Поверхностные скребки, связанные с донными, сгоняют образовавшуюся пену ко входу в отстойник либо перемещают ее к выходу из него при возвратном движении мостика.

Прямоугольные горизонтальные отстойники имеют два существенных недостатка:

- даже при тщательном контроле за распределением воды допустимая скорость ее потока остается ниже скорости, обычно поддерживаемой в радиальных отстойниках;
- устройства и приспособления для сбора осадка конструктивно более сложны, а их обслуживание сопряжено с определенными трудностями.

Но при этом при использовании горизонтальных отстойников (рис. 42) можно получить выигрыш в занимаемой площади в сравнении с радиальными отстойниками; по своим технико-экономическим показателям они, как правило, уступают другим типам отстойников.

Когда необходимо сократить объем очистных сооружений при ограниченности выделяемой площади и повысить эффективность отстаивания в существующих отстойниках (табл. 12), применяется тонкослойное отстаивание. В первом случае тонкослойные отстойники выполняют роль самостоятельных сооружений, во втором — существующие отстойники дополняются тонкослойными модулями, располагаемыми в реконструируемом отстойнике перед водосбросным устройством<sup>111</sup>.

<sup>111</sup> Данилович Д. А., Элов А. Н. Расчет и технологическое проектирование сооружений биологической очистки городских сточных вод в аэротенках с удалением азота и фосфора. — М., 2020.



Рис. 42. Горизонтальные отстойники с тонкослойными модулями

Таблица 12. Сравнение основных характеристик отстойников<sup>112</sup>

Оборудование	Технологические характеристики
Отстойники. Несколько конструкций, применяемых на очистных сооружениях (ОС) различного масштаба	Максимальная эффективность осаждения взвешенных веществ составляет 65–70 % (чем выше исходное содержание, тем выше эффективность). Снижение БПК <sub>5</sub> может достигать 50 %
Вертикальные отстойники	Простота эксплуатации: не требуется оборудование. Возможно залегание осадка на конических стенках днища. Высокая стоимость строительства вследствие большой глубины. Применимо только на ОС с проектной производительностью (ПП) от небольших и ниже
Горизонтальные отстойники	Максимальная технологическая эффективность, обусловленная более совершенной гидравликой. Максимальная компактность. Обязательно применение оборудования для сгребания осадка к приемкам. Более сложное и менее надежное оборудование, чем для радиальной конструкции. Применимы в широком диапазоне – от небольших до сверхкрупных ОС

<sup>112</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.



Таблица 12 (окончание)

Оборудование	Технологические характеристики
Многоконусные отстойники	Относительно невысокая эффективность. Простота эксплуатации: не требуется оборудование. Возможно залегание осадка на конических стенках днища. Высокая стоимость строительства вследствие большой глубины и материалоемкости. Более широкая сфера применения по сравнению с вертикальными — от малых до средних ОС
Радиальные отстойники	Очень высокая эффективность. Простое и достаточно надежное оборудование (илоскребы). Применимы для ОС — от средних до сверхкрупных

### Биологическая очистка

Со времени первоначальной разработки процессов с использованием активного ила и подобных сообществ, а также конструкций биологических реакторов их число и разнообразие увеличивались в результате углубления знаний о микробиологических процессах, технологического совершенствования оборудования, приборов и средств автоматизации, необходимости в повышении качества очищенной воды, в снижении инвестиционных и эксплуатационных расходов и других факторов.

После того как в 1920 г. появился способ обработки активным илом, были созданы различные конструкции реакторов: с поршневым потоком, с полным перемешиванием, в виде канала окисления, биореакторы последовательного действия, в виде многоступенчатых систем обработки, в частности, для удаления азота и фосфора. В течение последних десятилетий с разработкой мембранных методов в очистку сточных вод была внедрена и мембранная технология.

Стандартная система обработки активным илом состоит из трех основных элементов:

- реактор (обычно называемый аэротенком), в котором находится аэрируемая суспензия микроорганизмов, осуществляющих очистку;
- вторичный отстойник, или осветлитель, в котором происходит отделение ила от воды;
- устройство для рециркуляции забираемого из отстойника ила в реактор.

В большинстве случаев технология с активным илом применяется в сочетании с физическими или химическими процессами, используемыми для предварительной и первичной обработки сточных вод, а также часто и для завершающей очистки, включающей в себя обеззараживание и, возможно, фильтрование (доочистку).

Активный ил биологических ОС включает в себя три составляющие — биологическую, органическую (вне биомассы) и неорганическую, каждая из которых

способна связывать, в частности, ионы тяжелых металлов из водных сред. Микроорганизмы поглощают металлы в основном за счет физического и химического взаимодействия с высокомолекулярными веществами биополимерного геля, окружающего клетки бактерий активного ила. В этом случае задержание тяжелых металлов активным илом происходит в результате процесса сорбции. В условиях большого неисчерпанного резерва биолого-химической сорбционной системы активного ила остаточную несорбированную концентрацию веществ определяют ее физико-химические свойства.

Нефтепродукты и синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ) удаляются активным илом с использованием иных механизмов, нежели тяжелые металлы, — путем биохимического окисления. С учетом незначительной нагрузки по этим загрязнениям на активный ил эффективность их удаления находится на пределе возможностей биологической очистки, т. е. достигается предельная остаточная концентрация, которая может быть получена в процессе биологической очистки в данных условиях.

Микроорганизмы, участвующие в биологической очистке сточных вод, содержатся в виде колоний, часто в серо-бурой кашицеобразной субстанции с запахом земли — активном иле. По морфологии активный ил обычно представляет собой флоккулы размером несколько миллиметров. Они легко отстаиваются и оседают на дно, что позволяет достаточно быстро отделить чистую воду от отработанного ила.

Используются два варианта очистки: аэробная и анаэробная биологическая очистка. В первом случае процесс протекает в присутствии растворенного кислорода, во втором — без него.

Биологическая очистка сточных вод осуществляется в различных сооружениях, основные из которых следующие:

- биопруды и поля фильтрации — методы естественной аэробной биологической очистки;
- биологические фильтры — методы искусственной аэробной биологической очистки;
- аэротенки — методы искусственной биологической очистки (в зависимости от применяемой технологии процессы происходят в различных секциях аэротенков в аэробных, аноксидных и анаэробных условиях);
- метантенки — методы искусственной анаэробной биологической очистки.

**Биологические пруды** — искусственно созданные или естественного происхождения водоемы, часто с пассивной аэрацией, на дне которых находится основная масса микроорганизмов, удаляющих загрязнения. В биологической очистке воды также участвуют растения прудов, такие как ряска, камыш, рдест плавающий, тростник, рогоз и роголистник.

**Поля фильтрации** устраивают на суглинистых, глинистых, торфяных, песчаных участках почв. Через почву как фильтрующий материал пропускают воду. Почвенные микроорганизмы очищают воду от растворенных и взвешенных примесей. Это самые простые способы осуществления аэробной биологической очистки воды. При высоких концентрациях разлагаемых загрязнений в воде

и ее больших объемах эти способы не столь эффективны, но зато малозатратны и не нуждаются в постоянном контроле.

**Биофильтр** — это сооружение, в котором сточная вода фильтруется через загрузочный материал, покрытый биологической пленкой (био пленкой), образованной сообществом микроорганизмов. Типичный биофильтр состоит из следующих частей:<sup>113</sup>

- фильтрующей загрузки, помещенной в резервуар круглой или прямоугольной формы в сечении (тело биофильтра);
- водораспределительного устройства для равномерного орошения сточной водой поверхности загрузки;
- дренажного устройства для удаления профильтрованной жидкости;
- воздухораспределительного устройства для поступления воздуха в толщу загрузки.

Биофильтры классифицируются по следующим признакам:

- степени очистки: на полную и неполную биологическую очистку;
- способу подачи воздуха: с искусственной подачей воздуха (перколяционные фильтры) и с естественной аэрацией (аэрофильтры);
- режиму работы: с рециркуляцией сточной воды (т. е. с возвратом части очищенной жидкости в биофильтр) и без нее;
- технологической схеме: одно- и двухступенчатые биофильтры;
- пропускной способности: малой пропускной способности (капельные биофильтры) и большой (высоконагружаемые и башенные);
- виду и особенностям загрузочного материала: биофильтры с объемной (гравий, шлак, керамзит, щебень и др.) и плоскостной (пластмасса, ткань, асбестоцемент, керамика, металл и др.) загрузкой.

Биофильтры с *объемной загрузкой* различаются по высоте загрузки: капельные имеют высоту 1–2 м, высоконагружаемые — 2–4 м, башенные — 8–16 м.

Биофильтры с *плоскостной загрузкой* подразделяются на следующие:

- с жесткой насыпной загрузкой (керамические, пластмассовые или металлические насыпные элементы);
- с жесткой блочной загрузкой (гофрированные или плоские листы или пространственные элементы);
- с мягкой или рулонной загрузкой, выполненной из металлических или пластмассовых сеток, синтетических тканей, которые крепят на каркасах или укладывают в рулонах;
- погружные биофильтры, состоящие из пакета дисков, насаженных на горизонтальную ось вращения.

*Капельные биофильтры* используются для полной биологической очистки сточных вод с расходом не более 1000 м<sup>3</sup>/сут. В таких биофильтрах сточная вода поступает на поверхность в виде капель или струй через распределительные

<sup>113</sup> Лыкова О. В., Гогина Е. С. Биофильтры, их преимущества и недостатки // Вестник МГСУ. — 2009. — № S1. — С. 114–117.

устройства. Естественная или принудительная вентиляция воздуха происходит через открытую поверхность биофильтра сверху и/или снизу. Очищенная вода отводится снизу биофильтра через систему водоотвода.

Высота загрузки капельных биофильтров составляет 1,5–2,0 м, материал загрузки — обычно щебень, гравий и галька крупностью 25–40 мм. Гидравлическая нагрузка на капельных биофильтрах составляет 1–3 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>2</sup> поверхности загрузки в сутки. Рекомендуется применять рециркуляцию сточной воды на капельных биофильтрах при значениях БПК<sub>полн</sub> свыше 220 мг/л. Очищенная сточная вода может иметь БПК<sub>полн</sub> до 15 мг/л. Капельные биофильтры размещаются в зданиях в виде отдельных секций, которые могут быть круглыми или прямоугольными в сечении.

Недостатками капельных биофильтров являются низкая производительность и частое заиливание поверхности загрузочного материала, которое обычно возникает из-за превышения допустимой нагрузки по загрязнению.

*Высоконагружаемые биофильтры (аэрофильтры)* отличаются от других конструктивными особенностями, такими как большая высота слоя загрузки, крупность фракций загрузки и специальная конструкция днища и дренажа. Это обеспечивает возможность искусственной продувки материала загрузки воздухом, которая осуществляется путем воздушной подачи в закрытое междонное пространство вентилятором. Для обеспечения гидравлического контроля на отводных трубопроводах устанавливаются гидравлические затворы глубиной 200 мм. Высоконагружаемые биофильтры используются для полной и неполной биологической очистки на станциях, производительность которых может достигать 50 000 м<sup>3</sup>/сут, и размещаются на открытом воздухе. Высота рабочего слоя загрузки составляет 2–4 м, а крупность материала загрузки находится в диапазоне от 40 до 70 мм. Допустимое значение БПК<sub>полн</sub> сточных вод без рециркуляции не превышает 300 мг/л, а гидравлическая нагрузка составляет от 10 до 30 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·сут). Биофильтры требуют равномерного орошения всей поверхности с поддержанием повышенной нагрузки по воде и по возможности с малыми перерывами в подаче воды.

*Башенные биофильтры* имеют высоту 8–16 м и применяются для очистных сооружений с производительностью свыше 50 000 м<sup>3</sup>/сут при благоприятном рельефе местности и при БПК<sub>полн</sub> очищенных сточных вод до 20–25 мг/л. Крупность зерен загрузки — 60–80 мм. Используются за рубежом, в отечественной практике распространения не получили.

Преимущества *биофильтров с плоскостной загрузкой* в том, что они компактные, легко монтируются и могут использоваться с различными типами загрузочного материала. Однако они могут иметь ограничения по производительности при высоких расходах сточных вод. Такие биофильтры имеют компактный размер, низкое энергопотребление, высокую надежность в эксплуатации и не подвержены засорению. Кроме того, они легко строятся и могут быть изготовлены заводским способом для малых сооружений. В качестве загрузочного материала используются блочные, засыпные и рулонные материалы из пластических масс, металла, асбестоцемента, керамики, стекла, дерева, тканей и других материалов.

Биофильтры имеют круглую, прямоугольную и восьмигранную форму в сечении. Высота загрузочного слоя 3–8 м, плотность загрузки 10–250 кг/м<sup>3</sup>, удельная площадь поверхности 60–250 м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>. Гидравлическая нагрузка на 1 м<sup>3</sup> объема биофильтра в сутки<sup>114</sup> составляет 6–18 м<sup>3</sup>.

**Аэротенки (биореакторы)** отличаются более сложным устройством, чем биофильтры. Аэротенки представляют собой, как правило, сооружения прямоугольной формы, куда поступает сточная вода и возвратный активный ил, отделяемый во вторичных отстойниках. Здесь биологическая очистка воды осуществляется при обязательной принудительной аэрации. При поступлении в аэротенк сточная вода смешивается с активным илом.

Функционирование аэротенков основано на очистке сточных вод в результате жизнедеятельности активного ила. Активный ил как совокупность живых организмов (простейших, бактерий, водорослей, многоклеточных и т. д.) окисляет загрязнения в аэробных зонах аэротенков растворенным в водной среде кислородом. Подача и растворение в среде кислорода производится с помощью аэраторов, через которые в аэробные зоны аэротенков подается воздух, при этом одновременно осуществляется перемешивание иловой смеси для предотвращения оседания активного ила<sup>115</sup> на дно сооружения<sup>116</sup>. Для аэрации среды и компенсации потребляемого активным илом растворенного кислорода используются самые разнообразные пневматические, механические или гидравлические системы. Окисляемые органические соединения минерализуются до диоксида углерода и воды, при этом часть окисляемого органического вещества трансформируется в биомассу активного ила, что приводит к его приросту.

Аэротенки функционируют в паре с вторичным отстойником (осветлителем). Пребывание сточной воды во вторичном отстойнике приводит к осаждению ила. Возврат в аэротенк части осевшего активного ила приводит к повышению его концентрации в рабочей зоне аэротенка и росту окислительной мощности аэротенка.

*Биореакторы полупериодического (последовательного отъемно-доливного) действия* (рис. 43) более известны под английской аббревиатурой SBR (sequencing batch reactors). Процесс биологической обработки осуществляется в одном реакторе с полным перемешиванием, в котором последовательно производится аэрация и затем осветление сточной воды. Отстаивание ила происходит во время остановки аэрации, а чтобы удалить отстаившуюся воду, используется устройство для ее слива. Различные стадии обработки выполняются через заранее определенные и запрограммированные промежутки времени и образуют полный цикл.

<sup>114</sup> Гудков А. Г. Биологическая очистка городских сточных вод : учеб. пособие. — Вологда, 2002.

<sup>115</sup> Серпокрылов Н. С. и др. Экология очистки сточных вод физико-химическими методами. — М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009.

<sup>116</sup> Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. — 4<sup>th</sup> ed., revised.

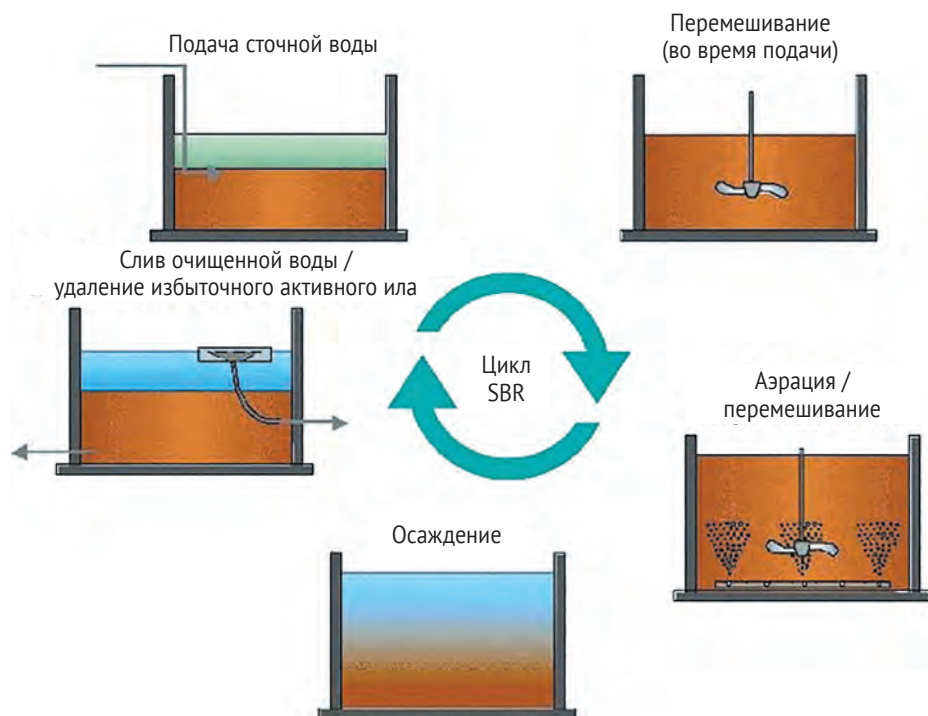


Рис. 43. Схема работы реактора последовательного действия (SBR)

Типичный цикл состоит из пяти последовательных операций, объединенных в три фазы процесса обработки:

- подача исходной сточной воды и ее биологическая обработка (аэрация–перемешивание) в реакторе;
- отстаивание (отделение ила);
- опорожнение (слив очищенной воды) без удаления осевшего ила или с раздельным удалением избытка осадка.

*Варианты биологической очистки  
городских сточных вод в аэротенках*

1. Биологическое удаление органических веществ и аммонийного азота

Этот процесс принято называть продленным окислением. В отличие от классического процесса биологического окисления (БО), при котором окисляются органические вещества, он сопровождается окислением аммонийного азота с образованием в качестве конечного продукта нитратов (через нитриты). Окисление аммонийного азота обычно происходит после окисления основной массы органических соединений, присутствующих в сточной воде. Для отличия всей группы процессов биологической очистки, включающей в себя нитрификацию, от классической биологической очистки здесь они именуется процессами глубокой биологической очистки (БН).

Конструктивное исполнение и движение технологических потоков при БН аналогично биологической очистке. При БН используется сочетание в одном сооружении двух микробиологических процессов:

- аэробное окисление органических загрязнений растворенным кислородом;
- аэробное окисление аммонийного азота до нитритов (первая стадия нитрификации) и нитратов (вторая стадия нитрификации)<sup>117</sup>.

Процесс нитрификации развивается как продолжение полной биологической очистки при увеличении времени пребывания сточной воды в аэротенках (например, когда увеличивают зону биологического окисления загрязнений сточной воды за счет уменьшения зоны регенерации возвратного ила) и при поддержании достаточного текущего количества растворенного кислорода в среде (не менее 2 мг/л в тех зонах, где происходит нитрификация). В подавляющем большинстве случаев проекты и эксплуатация сооружений более раннего поколения не включали процесс нитрификации в биологическую очистку.

Несмотря на внешнюю идентичность с классической биологической очисткой, процесс нитрификации городских сточных вод существенно отличается от нее. Для его эффективного протекания необходимо поддержание заданного минимального возраста ила. При снижении ниже этого значения процесс нитрификации нарушается и затем практически прекращается.

Высокое потребление кислорода на нитрификацию существенно увеличивает требуемое количество воздуха, который необходимо подавать в аэротенк — в 1,5–2,0 раза. Если это количество не будет подаваться, процесс нитрификации будет происходить лишь частично, даже при необходимом возрасте ила. Аналогично при нарушении возраста ила даже при необходимом расходе воздуха<sup>118</sup> процесс не будет происходить эффективно<sup>119</sup>. Поскольку процесс нитрификации приводит к выделению в воду ионов водорода, то при недостаточной буферности сточной воды возможно существенное снижение pH и, в свою очередь, ингибирование процесса нитрификации.

## 2. Биологическое удаление в аэротенках органических веществ и азота

На практике процесс реализован с протеканием биологической нитрификации и денитрификации (БНД). Применяемые в данном варианте технологические схемы приведены на рисунке 44. Обычно такое удаление осуществляется в секционированных аэротенках, куда поступают сточная вода и возвратный активный ил. Может быть также реализовано как циклический процесс, с осуществлением последовательно биохимических процессов и отстаиванием ила в едином сооружении (в России имеются единичные объекты с циклическими реакторами).

<sup>117</sup> Экспериментальные методы в очистке сточных вод / гл. ред. англ. текста М. ван Лосдрехт, П. Х. Нильсен, К. Лопес-Васкес, Д. Брджанович ; пер. с англ. Н. В. Кахаевой. — Томск : Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2020.

<sup>118</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.

<sup>119</sup> Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками.

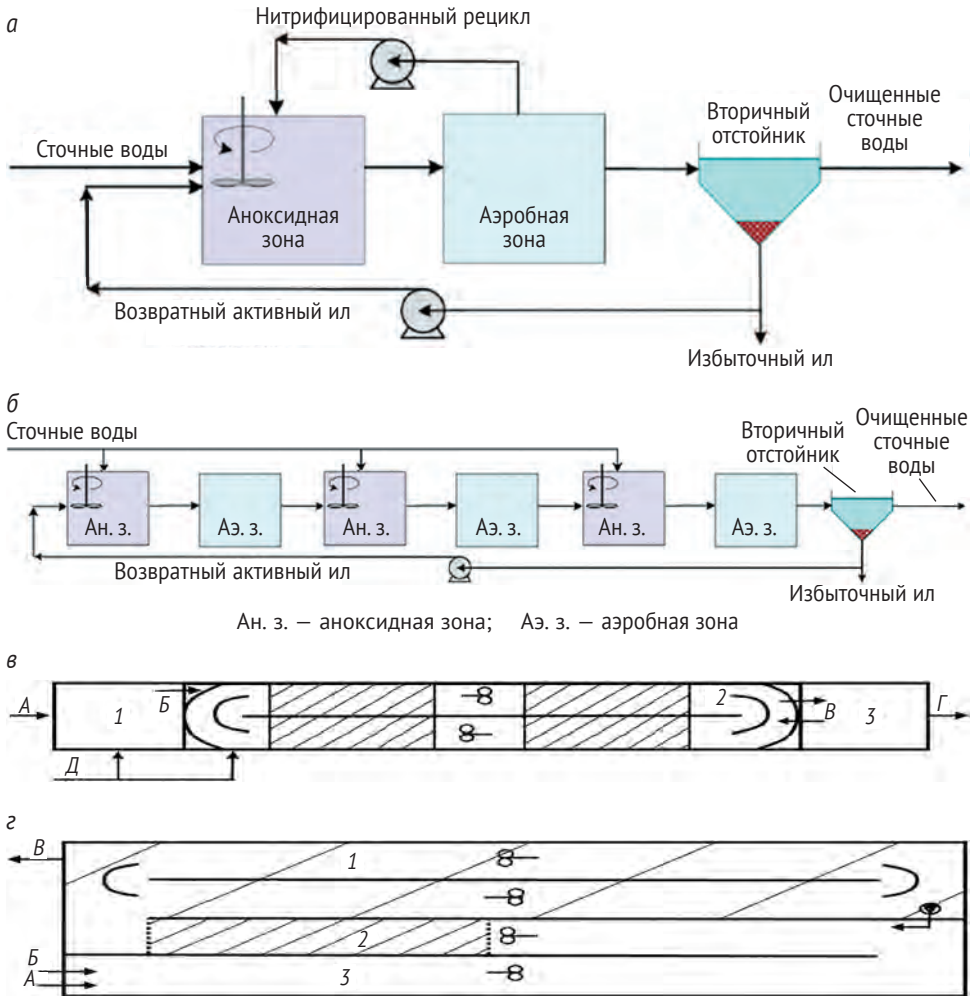


Рис. 44. Варианты технологического процесса нитрификации-денитрификации в аэротенках:

*а* – модифицированный процесс Лудзака-Эттингера (МЛЭ), также называемый предвключенной денитрификацией; *б* – ступенчатая нитрификация-денитрификация (могут использоваться две или три ступени с чередованием аноксидной и аэробной зон); *в* – «карусельная» нитрификация-денитрификация; *г* – попеременная или симультанная нитрификация-денитрификация.

Условные обозначения к рисунку *в*:

1 – первичный отстойник; 2 – биореактор; 3 – вторичный отстойник; А – поступающая сточная вода; Б – осветленная сточная вода; В – возвратный ил; Г – очищенная сточная вода; Д – реагент (FeCl<sub>3</sub>); заштрихованная часть – зона переменной аэрации.

Условные обозначения к рисунку *г*:

1 – зона симультанного процесса (концентрация O<sub>2</sub> в пределах 0,3–0,8 мг/л); 2 – зона переменной аэрации; 3 – зона без аэрации; А – поступающая сточная вода; Б – возвратный ил; В – иловая смесь на вторичные отстойники



Технология основана на использовании в одном сооружении трех микробиологических процессов:

- аэробное окисление органических загрязнений растворенным кислородом;
- аэробное окисление аммонийного азота до нитратов (нитрификация);
- аноксидное окисление органических загрязнений кислородом нитратов, с восстановлением нитратного азота до молекулярного (денитрификация).

Условием проведения денитрификации является отсутствие в иловой смеси в течение необходимого времени растворенного кислорода либо его очень малая концентрация (до 0,5 мг/л) при одновременном присутствии органических веществ. Для проведения двух групп процессов, характеризующихся разными потребностями в растворенном кислороде, используют следующие основные приемы:

- физическое разделение процессов путем выделения специальных зон нитрификации и денитрификации (зоны N и D);
- разделение процессов во времени в одном и том же объеме сооружения; применяется частичное разделение во времени, при этом фазы нитрификации и денитрификации повторяются многократно;
- комбинированное использование физического и временного разделения процессов;
- одновременное проведение, когда весь процесс очистки проводится при невысоких значениях концентрации растворенного кислорода (до 1 мг/л).

Бактерии, осуществляющие нитрификацию и денитрификацию, существуют в единой иловой смеси, функционируя в соответствующих зонах (временных интервалах) либо в единой зоне с промежуточными условиями. Обязательным условием жизнедеятельности бактерий-денитрификаторов является наличие органического вещества, которое они могут потреблять в процессе восстановления нитратов, для чего необходимы углерод и водород органического соединения.

Для обеспечения возможности нитрификации-денитрификации при использовании различных зон применяется такой технологический прием, как рециркуляция между зонами. Необходимость этого обусловлена тем, что процесс нитрификации происходит тогда, когда почти все органические загрязнения удалены.

В схемах с зональным разделением нитрификации и денитрификации производится рециркуляция иловой смеси, содержащей нитраты, из конца аэробной зоны в начало аноксидной. Эта рециркуляция осуществляется с помощью погружных насосов путем создания горизонтально ориентированными мешалками бесконечного потока («карусель») иловой смеси между зонами, а также с помощью эрлифтов (используется только на малых установках).

Способы аэрации — аналогично БО. Зоны денитрификации должны перемешиваться для предотвращения расслоения иловой смеси и для массообмена. Перемешивание на большинстве объектов — с помощью погружных мешалок (оптимальный метод). Несколько объектов было выполнено с перемешиванием воздухом с минимизацией растворения кислорода (нерациональный метод).

Возвратный активный ил подается в начало зоны денитрификации либо в единый объем аэротенка.

3. Биологическое удаление в аэротенках органических веществ и азота с химическим удалением фосфора (БНДХФ)

По технологии биологической очистки данный вариант очень близок к БНД. Технологические схемы БНД и БНДХФ отличаются только добавлением реагента для улучшенного удаления фосфора. На очистных сооружениях в России реагент добавляют (применительно к биологической очистке):

- в конце аэротенка — перед вторичными отстойниками;
- в возвратный активный ил;
- в возвратные потоки от сооружений обработки осадка.

Вне биологической очистки реагент добавляется перед первичными отстойниками, а также перед фильтрами доочистки. Используются коагулянты, так как удаление фосфора происходит в основном путем сорбции фосфатов на хлопья гидроксида железа или алюминия. Эти хлопья, в свою очередь, включаются в состав хлопьев активного ила. Доза реагента пропорциональна количеству удаляемых фосфатов. Кроме того, она сильно зависит от местных условий и точек введения реагента. Необходимая доза существенно возрастает относительно обычных значений, когда нужно обеспечить максимальную глубину удаления. Оптимальная остаточная концентрация фосфатов 0,5–0,7 мг/л, возможно достижение 0,2–0,4 мг/л, но при существенном увеличении расхода реагента.

4. Биологическое удаление в аэротенках органических веществ и азота с биологическим удалением фосфора (БНДБФ)

Биологическая очистка в аэротенках принципиально отличается от БНД наличием еще одной технологической зоны — анаэробной. Эта зона часто называется зоной биологического удаления фосфора, хотя суть процессов в ней прямо противоположна. Данная зона конструктивно может быть расположена как часть аэротенка либо выделена в отдельную емкость, называемую фосфорным бассейном. В циклических реакторах вместо анаэробной зоны используется анаэробная стадия процесса в едином объеме сооружения. Некоторые применяемые на практике технологические схемы процесса приведены на рисунке 45.

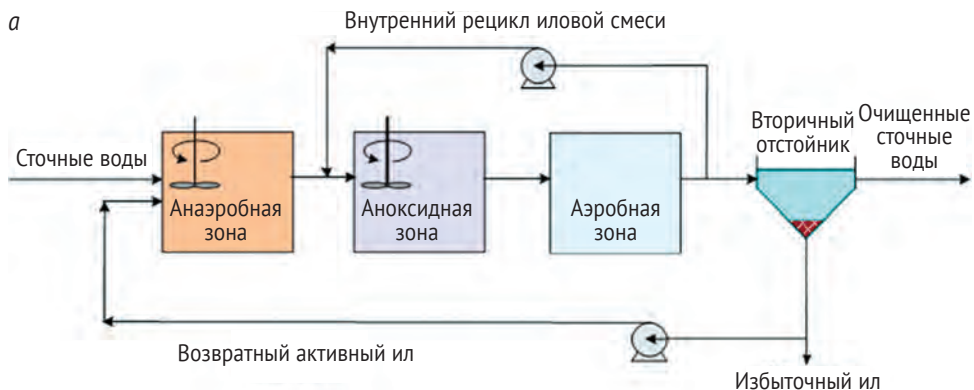


Рис. 45. Различные технологические схемы процесса биологической очистки сточных вод (различное сочетание анаэробно-аноксидно-оксидных зон).

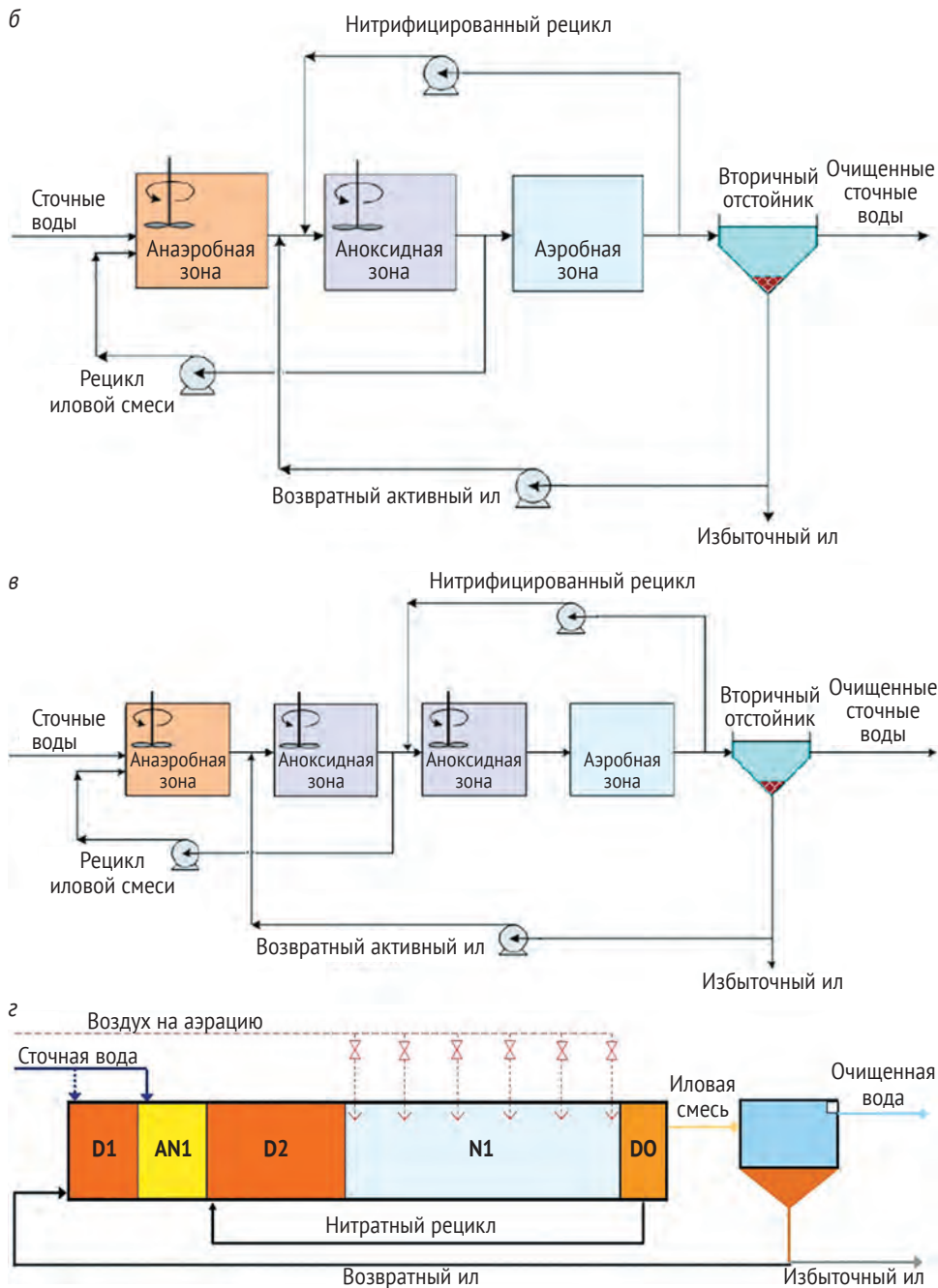


Рис. 45 (окончание):

а – процесс  $A^2/O$  (анаэробик–аноксик–оксик); б – процесс Кейптаунского университета (UCT); в – модифицированный процесс UCT (МУСТ); г – JNB-процесс: D1 – зона предварительной денитрификации (аноксидная); AN1 – анаэробная зона; D2 – зона денитрификации (аноксидная); N1 – зона нитрификации (аэробная); DO – деоксидная зона

Большую часть схем удаления фосфора реализуют с выполнением стадий нитрификации и денитрификации по предвключенной технологии, «карусельной» (циркуляционной) или симультанной технологии.

Благодаря наличию анаэробной зоны, согласно современным представлениям, технология реализуется в результате сочетания следующих четырех микробиологических процессов, осуществляемых одним илом:

- аэробное окисление органических загрязнений растворенным кислородом. В данном процессе проводится двумя различными функциональными группами микроорганизмов. Первая — обычные гетеротрофы, потребляющие различные органические соединения. Вторая — фосфор-аккумулирующие микроорганизмы (ФАО), способные потреблять внутриклеточные полимерные соединения, образованные из накопленных в анаэробной зоне и потребленных летучих жирных кислот (ЛЖК). В аэробных условиях для запасания энергии клетки ФАО используют специфический механизм накопления полифосфатов в количествах до 20–30 % фосфатов от сухого вещества клеток данных бактерий и до 5–7 % от сухого вещества ила в целом;
- анаэробное поглощение ФАО летучих жирных кислот с преобразованием их во внутриклеточное полимерное соединение, с выделением при этом в жидкую фазу фосфатов. Они выделяются в результате распада полифосфата, дающего клеткам ФАО энергию на поглощение и биохимическую трансформацию ЛЖК. Окисление органических соединений, образующихся в анаэробных условиях, происходит позже, при попадании иловой смеси как в аэробные условия, так и в зону денитрификации (денитрифицирующие ФАО);
- аэробное окисление аммонийного азота до нитратов (нитрификация);
- аноксидное окисление органических загрязнений кислородом нитратов, с восстановлением нитратного азота до молекулярного (денитрификация).

Данный процесс может также проводиться денитрифицирующими ФАО.

В простейшем виде технология функционирует следующим образом: возвратный активный ил попадает в анаэробную зону, куда поступает сырая сточная вода, затем иловая смесь поступает в блок БНД, после чего — на стадию илоразделения.

Важным условием эффективного биологического удаления фосфора является предотвращение попадания в анаэробную зону существенных концентраций нитратов, так как в их присутствии ЛЖК, находящиеся в сточной воде, будут потребляться не ФАО, а денитрификаторами. Особенность процесса БНД — значительное содержание нитратов в возвратном активном иле — до 6–9 мг/л. В условиях, как правило, невысокой концентрации БПК в сточных водах в России и, соответственно, невысокого содержания ЛЖК описанная технология с подачей возвратного ила сразу в анаэробную зону работает плохо. Для обеспечения низкого содержания нитратов в подаваемом в нее иле его вначале подвергают денитрификации либо внутри технологии БНД, либо в отдельной зоне. Подача в анаэробную зону иловой смеси, прошедшей предварительную денитрификацию, используется в зависимости от разновидности метода. С этой целью применяют рециркуляционные насосы.

Процесс с удалением фосфора, аэрация и перемешивание производятся аналогично схеме БНД. Анаэробную зону перемешивают только мешалками.

Группа технологий БНДБФ, несмотря на 40-летнюю историю применения, по-прежнему активно развивается. Это связано со сложностью микробиологических и биохимических процессов, протекающих при взаимодействии четырех перечисленных групп микроорганизмов. Необходимым условием является наличие минимально необходимого соотношения величин БПК и общего фосфора. При меньших значениях сточная вода не будет содержать достаточно органического вещества, чтобы его хватило и для денитрификации, и для роста ФАО. Важно также содержание ЛЖК, однако при достаточном количестве БПК на его увеличение можно влиять.

При дальнейшей обработке избыточного активного ила с повышенным содержанием фосфора не должно допускаться образование в нем анаэробных условий<sup>120</sup>, особенно при наличии доступного органического вещества, так как в этом случае ФАО в соответствии со своим метаболизмом быстро выделяют фосфор<sup>121</sup>.

#### 5. Биологическое удаление в аэротенках органических веществ и азота с биологическим удалением фосфора, улучшенным с помощью ацидофикации

Для возможности надежного осуществления биологического удаления фосфора в условиях недостаточной концентрации ЛЖК разработана группа технологий, которые при взаимодействии с БНДБФ существенно повышают ее эффективность и надежность.

Простейшее, но дорогостоящее решение (в Российской Федерации не применяется) — дозировать в анаэробную зону ЛЖК (уксусной кислоты). Этот реагент играет роль субстрата для ФАО, инициируя их рост.

Дешевым способом получения ЛЖК является выработка их из органического вещества поступающей сточной воды в результате процесса ацидофикации (обеспечения кислотами). Другая, также актуальная, задача, решаемая при ацидофикации, — увеличение соотношения БПК/азот для проведения денитрификации до необходимой глубины<sup>122</sup>. Для этого осуществляют дополнительные технологические процессы с обработкой осадка первичных отстойников. Используют следующие разновидности ацидофикации:

- рециркуляция осадка в первичных отстойниках, с подачей выведенного осадка снова в распределительную камеру отстойников; при этом ЛЖК, образовавшиеся в результате биохимических процессов, поступают в воду и далее с осветленной водой — в анаэробную зону аэротенков;
- уплотнение осадка первичных отстойников с подачей сливной воды перед аэротенками;

<sup>120</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.

<sup>121</sup> Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван. — М. : Мир, 2006.

<sup>122</sup> *Большаков Н. Ю.* Оптимизация технологического процесса в системе аэротенк–отстойник для минимизации сброса органических веществ и биогенных элементов : дис. ... канд. техн. наук. — СПб., 2005.

- ферментация осадка в отдельных ацидофикаторах с последующим уплотнением и подачей сливной воды перед аэротенками (в Российской Федерации не применяется);
- ферментация иловой смеси в анаэробной зоне в отсутствие перемешивания.

*Биологическая очистка сточных вод анаэробными микроорганизмами с образованием биогаза*

Главной особенностью этого процесса является протекание в отсутствие кислорода. В качестве конечного продукта в результате биохимической трансформации с участием анаэробных микроорганизмов образуется биогаз<sup>123</sup>, состоящий главным образом из диоксида углерода (углекислого газа) и метана<sup>124</sup>. На практике процесс реализуется чаще всего в метантенках для метаногенного сбраживания осадка сточных вод. В резервуар метантенка подается осадок из отстойников, который подвергается сбраживанию. Для ускорения процесса используют повышение температуры до 35°С при мезофильном сбраживании и до 55°С — при термофильном. Применение данной технологии не позволяет обеспечить удаление из воды азота и фосфора.

Смесь прошедшей аэробную биологическую очистку сточной воды и активного ила поступает на сооружения илоразделения, уносит с собой активный ил и отслоившуюся биопленку (при использовании на стадии биологической очистки биофильтров). Процессы илоразделения осуществляются во вторичных отстойниках методом флотации, а в последнее время на сооружениях небольшой мощности и на ультрафильтрационных мембранах.

*Вторичные отстойники* используются с целью задержания активного ила, который поступает вместе с очищенной водой. Различают три вида вторичных отстойников: вертикальные, горизонтальные и радиальные. На очистных станциях с небольшой пропускной способностью (до 20 000 м<sup>3</sup>/сут) используются вертикальные отстойники, а на станциях средней и большой пропускной способности (более 15 000 м<sup>3</sup>/сут) — горизонтальные и радиальные.

Вертикальные отстойники могут быть круглыми или квадратными в сечении, их преимуществами являются легкость удаления осевшего ила под гидростатическим давлением, компактность расположения и простота конструкции. Однако их глубина может быть значительной, что повышает стоимость строительства, а также может привести к залеживанию осевшего активного ила и развитию в нем анаэробных процессов.

<sup>123</sup> Биогаз — газ, получаемый водородным или метановым брожением биомассы. Метаногенное разложение биомассы происходит под воздействием сообщества бактерий. В цепочке питания последующие бактерии питаются продуктами жизнедеятельности предыдущих. Первый вид — гидролитические бактерии, второй — кислотообразующие, третий — трансформирующие кислоты и другие промежуточные низкомолекулярные продукты метаболизма в ацетат, четвертый — образующие метан из ацетата, а также водорода и углекислого газа.

<sup>124</sup> Метан (СН<sub>4</sub>) — простейший по составу предельный углеводород, при нормальных условиях бесцветный газ без вкуса и запаха. Малорастворим в воде, почти в два раза легче воздуха. Нетоксичен, но при высокой концентрации в воздухе обладает слабым наркотическим действием.

Горизонтальные отстойники имеют ширину зоны осаждения 6 и 9 м и могут комбинироваться с типовыми аэротенками, что сокращает площадь, занимаемую очистными сооружениями. В горизонтальных отстойниках для сбора осевшего активного ила используются скребковые механизмы цепного или тележечного типа, а также подвижные илососы, установленные на тележках. Недостатками горизонтальных отстойников являются сложности эксплуатации скребковых механизмов и большая материалоемкость по сравнению с вертикальными отстойниками.

В сооружениях биологической очистки вторичные отстойники располагаются после биоокислителей (аэротенков и биофильтров) и предназначены для разделения активного ила и очищенной воды, выходящей из аэротенков. Они также могут задерживать биологическую пленку, содержащуюся в воде, выходящей из биофильтров. Работа вторичных отстойников влияет на эффективность удаления из воды взвешенных веществ. Объем аэрационных сооружений зависит от концентрации возвратного ила и способности отстойников разделять иловые смеси. Иловая смесь представляет собой многофазную систему, где биологически очищенная сточная вода служит дисперсионной средой, а хлопья (флокулы) активного ила — основным компонентом дисперсной фазы. Агрегативная неустойчивость иловой смеси проявляется в изменении диаметра хлопьев активного ила при перемешивании. При снижении интенсивности перемешивания иловая смесь агрегируется в более крупные хлопья, которые осаждаются под воздействием силы тяжести. Осаждение хлопьев активного ила происходит с образованием видимой границы раздела фаз, если его концентрация в иловой смеси превышает 0,5–1,0 г/л.

*Мембранные способы очистки и илоотделения.* Сточные воды фильтруются, проходя через мембраны — полупроницаемые материалы, которые не пропускают молекулы воды и задерживают большинство примесей. Основные методы мембранной очистки — фильтрация через микрофильтрационные и ультрафильтрационные мембраны, диализ и обратный осмос.

Мембранная фильтрация воды через материалы с малым размером пор получила признание и широкое распространение благодаря высокому качеству фильтрата, который, в зависимости от размера пор, может содержать после разделения на мембранах пониженное количество солей, органических веществ, бактерий и твердых частиц коллоидно-дисперсных примесей. Для глубокой очистки городских сточных вод во многих случаях достаточно ограничиться задержанием бактерий, например кишечной палочки, и более крупных частиц, входящих в состав биологических сообществ очистных сооружений (в виде активного ила или биологической пленки), непосредственно участвующих в биохимических реакциях очистки<sup>125</sup>. Мембраны в таких системах выполняют роль разделительных устройств, отделяющих биомассу от очищенной воды. Такая роль характерна для крупнопористых микрофильтрационных мембран (размер

<sup>125</sup> Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А. Использование мембранных технологий в процессах глубокой очистки городских сточных вод // Инновации и инвестиции. — 2017. — № 11. — С. 175 — 178.

пор  $\geq 0,1$  мкм). Ультрафильтрационные и обратноосмотические мембраны применяются в специальных технологиях промышленной водоподготовки.

Существенными недостатками мембранных методов являются загрязнение поверхности и резкое снижение проницаемости мембран в ходе их эксплуатации. Для предотвращения этого негативного процесса совершенствуются способы восстановления фильтрующей способности мембран путем релаксации мембран, их обратной промывки, обработки кислотами, щелочами, реагентами-окислителями (пероксид водорода, озон, гипохлорит натрия). При использовании мембранных способов очистки сточных вод часто требуется предварительная очистка воды от масел, абразивных частиц, растворителей, ПАВ<sup>126</sup>.

Необходимость развития глубокой очистки сточных вод продиктована возрастающими требованиями к содержанию остаточных загрязнений в воде, сбрасываемой в природные водоемы, а также в ряде специфических случаев — особыми условиями размещения очистных сооружений, например, для поселений в арктических регионах Крайнего Севера или засушливых районах Средней Азии и Крыма, также для относительно небольших поселений, расположенных на неосвоенных территориях при отсутствии водных объектов, которые могли бы быть приемниками очищенных стоков, а также поселений на особо охраняемых природных объектах с высокой степенью защиты водной среды.

Мембранная фильтрация является частью системы очистки сточных вод, ее использование необходимо увязать с наилучшими доступными технологиями очистки сточных вод и обработки осадков. При реализации мембранной технологии показатели состава очищенной воды по БПК, ХПК и взвешенным веществам приближаются к значениям на уровне ПДК, поэтому логично дополнять мембранную фильтрацию другими технологическими решениями для достижения требуемых показателей, в частности, по общему и аммонийному азоту, включая ПДК<sub>рыбхоз</sub> по  $N-NH_4^+$  (0,39 мг/л), а также по общему фосфору и фосфору ортофосфатов ( $P-PO_4^{5-}$  — от 0,05 до 0,20 мг/л). Очищенная до таких показателей вода может сбрасываться в любые водные системы либо повторно использоваться в промышленности и сельском хозяйстве.

Промышленность осваивает производство самых разнообразных типов мембран: полимерных и керамических, полволоконных и листовых, которые дают возможность удалять из воды подавляющее количество вредных веществ. Конструктивно мембраны подразделяются на пять классов полимерных мембран, шестой класс представлен модулями с керамическими мембранами.

Из листовых мембран изготавливают рулонные и патронные модули, также имеются модули с трубчатыми и полволоконными мембранами. Последние выпускаются двух типов: напорные модули в корпусе и погружные бескорпусные модули для оснащения мембранных биореакторов. В свою очередь напорные модули разделяются на две группы: первая оснащается полимерными непористыми мембранами и предназначена для разделения газовых смесей, вторая включает в себя пористые полимерные мембраны и используется для жидкофазных процессов разделения.

<sup>126</sup> ПАВ — поверхностно-активные вещества, это химические соединения, адсорбирующиеся на поверхности раздела фаз (тел) и образующие на ней слой повышенной концентрации (адсорбционный слой).



Широкомасштабное использование мембранных установок для очистки сточных вод стало доступно лишь в последние 10–15 лет. Основанная на мембранной фильтрации технология сегодня успешно применяется, прежде всего, на относительно небольших сооружениях.

Илоразделение на мембранах происходит обычно с использованием микрофильтрационных (МФ) мембран и низкого давления или ультрафильтрационных (УФ) мембран.

Технология мембранного биореактора (МБР) представляет собой комбинированный процесс, объединяющий глубокую биологическую очистку и селективное разделение (рис. 46). Применение МБР не только открывает возможность существенной интенсификации процессов биологической очистки за счет увеличения концентрации активного ила в зоне биологического окисления, а следовательно, за счет роста окислительной мощности очистных сооружений, но и позволяет значительно повысить надежность и других этапов очистки сточных вод. Современные полимерные и неорганические мембраны, применяемые в технологии МБР, являются физическим барьером, исключающим вынос биомассы из зоны биологической очистки. Процессы мембранной фильтрации считаются ключевой особенностью современных схем очистки, водооборота и повторного использования сточных вод — искусственного пополнения подземных вод, в сельскохозяйственных целях и для промышленности.

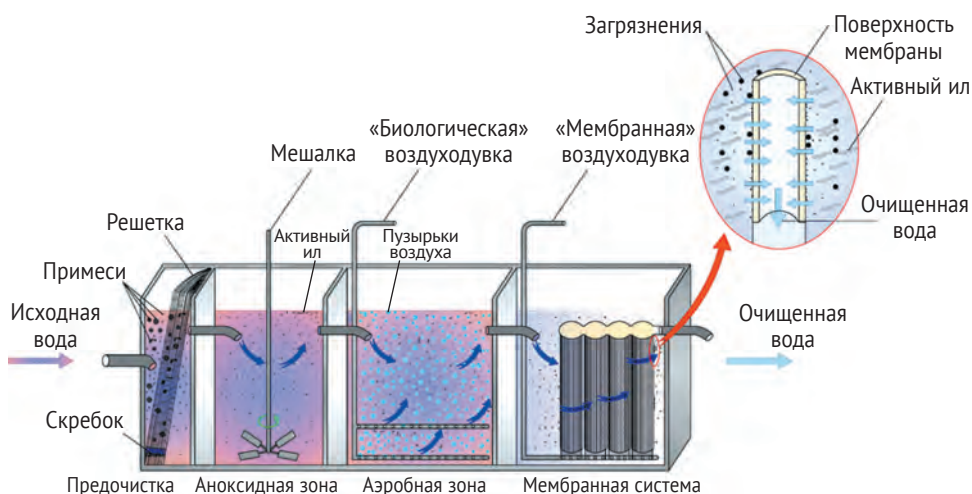


Рис. 46. Схема технологического процесса очистки с использованием мембранного биореактора

В случае недостижения требуемых параметров применяется доочистка сточных вод для повышения качества очистки глубже возможностей биологической очистки по взвешенным веществам, фосфатам, БПК, аммонийному азоту. С этой целью применяются фильтры разной конструкции с различной загрузкой<sup>127</sup>.

<sup>127</sup> Трунов П. В. Особенности процесса очистки сточных вод в погружных мембранных биореакторах // Коммунальное хозяйство городов. — 2010. — № 93. — С. 133–137.

### Обеззараживание сточных вод

Этот важнейший этап очистки сточных вод связан с дезинфекцией очищаемой воды перед спуском в водоем из-за необходимости уничтожения патогенных микроорганизмов и устранения опасности заражения водоема.

Дезинфекция сточных вод проводится различными способами, но наибольшее распространение получило хлорирование — введение в сточную воду определенного количества хлора или гипохлорита натрия. Сущность обеззараживающего действия хлора заключается в агрессивном воздействии на клетки микроорганизмов (бактерий и др.), в результате чего они погибают.

Контакт хлора или иного дезинфицирующего реагента со сточной водой происходит в контактном резервуаре. В качестве последнего применяют горизонтальные отстойники без скребков с уклоном днища  $0,05^\circ$  и вертикальные отстойники. Продолжительность контакта хлора со сточной водой составляет 30 мин при максимальном расчетном ее притоке.

Наряду с хлорированием среди основных методов обеззараживания выделяют озонирование и ультрафиолетовое облучение очищенной сточной воды (рис. 47). В настоящее время использование ультрафиолета основано на том, что предварительно очищенная сточная вода проходит сквозь зону ультрафиолетового излучения с длиной волны 200–315 нм, при этом излучаемый поток повреждает клетки микроорганизмов и внутриклеточные процессы, что приводит к гибели клеток.

Конструктивно установка УФ-обеззараживания представляет собой камеру, в которой расположены ультрафиолетовые лампы, защищенные чехлом. В зависимости от качества обрабатываемой воды определяется периодичность промывки и обслуживания ламп.

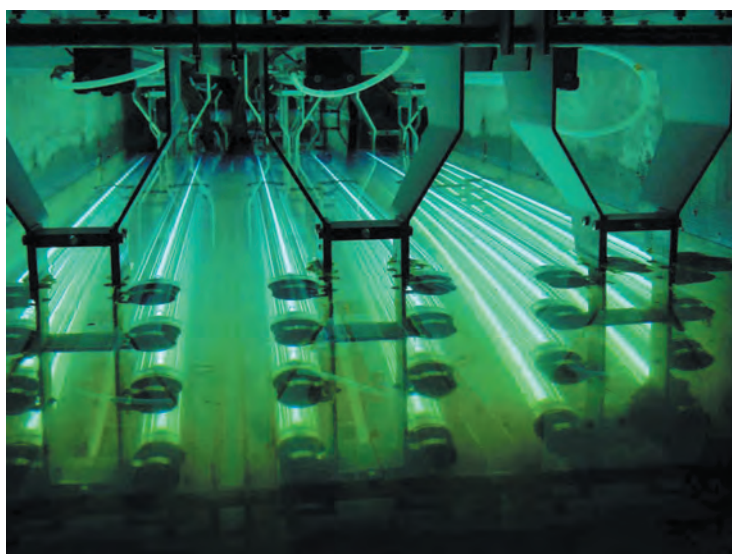


Рис. 47. Установка УФ-обеззараживания

Ультрафиолетовое излучение в диапазоне 205–315 нм обладает сильным биоцидным действием на различные микроорганизмы, такие как бактерии, вирусы и грибы. В области 250–270 нм достигается максимальное бактерицидное действие. Однако использование ультрафиолетового излучения вместе с хлорированием и озонированием не гарантирует уничтожения возбудителей паразитологических заболеваний.

Действие ультрафиолетового излучения на микроорганизмы основано, в первую очередь, на необратимом повреждении молекул ДНК и РНК за счет фотохимического воздействия лучистой энергии. Инактивация микроорганизмов зависит от интенсивности излучения, мВт/см<sup>2</sup>, и времени облучения, с. Доза облучения, мДж/см<sup>2</sup>, является мерой бактерицидной энергии, передаваемой микроорганизмам.

Процесс обеззараживания сточных вод ультрафиолетовым излучением имеет несколько преимуществ: незначительное время контакта с водой, отсутствие образования опасных химических соединений и летучих токсичных веществ, отсутствие необходимости в обезвреживании и хранении опасных материалов. Кроме того, данный процесс не оказывает вредного влияния на водную биоту и не имеет пролонгированного биоцидного эффекта<sup>128</sup>.

Озон является мощным дезинфицирующим средством и может уничтожать различные виды микроорганизмов, в том числе бактерии, вирусы и грибы. Озонирование может использоваться для удаления различных загрязнений в сточных водах, включая органические соединения, жир, аммиак и другие химические вещества. Озонирование происходит путем пропускания озонированного воздуха через сточные воды. Озонированный воздух содержит высокие концентрации озона, который окисляет загрязнения в воде, уничтожая их. Процесс озонирования также может быть усилен путем добавления катализаторов, которые помогают ускорить процесс окисления.

Преимущества озонирования сточных вод включают в себя быстрое и эффективное удаление загрязнений, высокую степень дезинфекции, отсутствие образования опасных токсичных веществ, необходимость в меньшем количестве химических реагентов по сравнению с другими методами обеззараживания и возможность использования для обработки больших объемов сточных вод. Однако озонирование может быть довольно дорогостоящим процессом, который требует специального оборудования и квалифицированных специалистов. Также озонирование не является идеальным методом для удаления всех типов загрязнений, включая некоторые токсичные вещества, которые могут остаться в воде после обеззараживания.

### *Физико-химическая очистка*

Данный этап используется при необходимости очистки промышленных сточных вод. Этот метод эффективен для очистки сточных вод от нерастворимых частиц размером 1–1000 нм, некоторых щелочей, кислот, ионов, а также

<sup>128</sup> МУ 2.1.5.732-99. Водоотведение населенных мест. Санитарная охрана водоемов.

для разрушения трудноокисляемых и органических соединений. На этапе физико-химической очистки из предварительно очищенных сточных вод удаляются коллоидные и мелкодисперсные частицы.

### Механизмы физико-химической очистки

1. *Коагуляция.* В сточных водах находятся мелкодисперсные частицы (непосредственно загрязнения), которые равномерно распределены по водной массе. Эти частицы не могут агрегировать друг с другом, поскольку имеют одинаковый отрицательный заряд. При очистке методом коагуляции (рис. 48) встает задача нейтрализации заряда мелких частиц, что позволит их объединить и затем удалить. С этой целью в воду добавляют вещества-коагулянты, которые в результате химических взаимодействий образуют положительно заряженные ионы. Они притягивают отрицательно заряженные частицы загрязнений и образуют осадок, состоящий из крупных хлопьев диаметром до 3 мм. Дальнейшая очистка происходит механическим способом<sup>129</sup>.

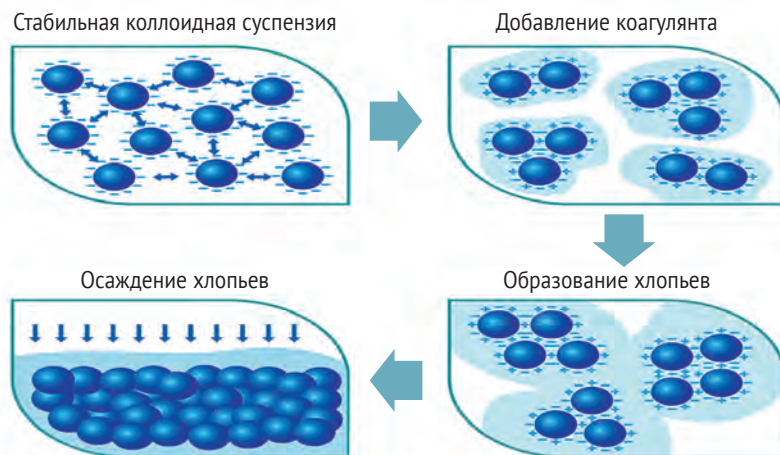


Рис. 48. Схема коагуляции

2. *Флокуляция.* В сточные воды добавляют вещества-флокулянты, которые объединяют частицы примесей, формируют крупные хлопья и удаляют загрязнения за счет различных механизмов: адсорбция загрязнений на поверхности; связывание примесей под действием сил межмолекулярного взаимодействия; образование водородных связей между загрязнениями и флокулянтами.

Флокулянты делятся на две группы:

1) природные: крахмал, декстрин, гуаровые смолы, альгинат натрия, кремниевая кислота;

2) синтетические: полиакриламид, сополимеры акриламида и органических соединений (анионные и катионные реагенты).

<sup>129</sup> Воронов Ю. В., Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод.

Флокуляция (рис. 49) происходит в трубопроводах, соединяющих оборудование очистки сточных вод, или в отдельных емкостях и резервуарах.

Комбинирование методов коагуляции и флокуляции улучшает качество очистки сточных вод.

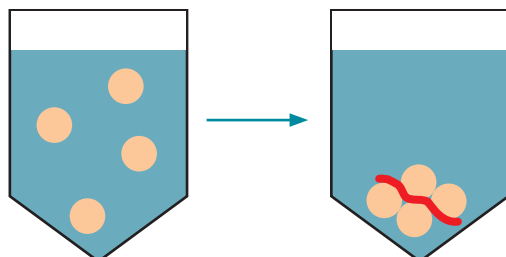


Рис. 49. Схема флокуляции

3. *Адсорбционный способ.* Адсорбция удаляет примеси, которые не разлагаются бактериями или являются токсичными.

Распространенные адсорбенты:

- силикагели и алюмогели;
- активные глины;
- зола, шлаки;
- опилки;
- коксовая мелочь;
- торф;
- активированный уголь разных марок.

Адсорбенты слабо взаимодействуют с водой и хорошо поглощают органические соединения. Загрязнения могут извлекаться из адсорбента. В таком случае адсорбент используется повторно.

4. *Экстракционный способ.* В основе лежит различное распределение вещества между двумя несмешивающимися жидкостями. В сточные воды добавляется экстрагент (часто это органический относительно неопасный и недорогой растворитель). При наступлении равновесия загрязняющие вещества распределяются так, что большинство примесей из воды переходит в добавленную жидкость. Затем экстрагент с загрязнениями удаляется из сточных вод. Метод актуален, если в стоках содержатся технически ценные органические вещества: фенолы, жирные кислоты.

5. *Флотация.* Метод основан на прилипании взвешенных в воде примесей к пузырькам воздуха. В специальные установки со сточными водами — флотаторы — нагнетают воздух под давлением. Пузырьки под влиянием сил поверхностного натяжения соединяются с нерастворимыми примесями и увлекают их на поверхность жидкости. В методе напорной флотации образуется шлам (осадок в виде мелких частиц), который легко удаляется механическим способом. При химической флотации в сточные воды добавляют вещества, которые в результате реакций образуют пузырьки газа: кислород, углекислый газ, хлор.

6. *Электрохимические способы.* В специальной установке — электролизере — создается электрическое напряжение между электродами. Когда сточные воды проходят через межэлектродное пространство установки, наблюдаются следующие процессы:

- поляризация частиц;
- окислительно-восстановительные реакции;
- электрофорез;
- электролиз.

Добавление специальных реагентов не требуется, но расход электроэнергии большой.

### *Методы электрохимической очистки*

1. *Электрокоагуляция.* Сточные воды пропускают через железные или алюминиевые аноды, далее происходит электролитическое растворение металлов. В сточную воду переходят ионы, которые образуются при анодном растворении материала. Ионы алюминия или железа трансформируются в соли/гидроксиды, которые отвечают за коагуляцию примесей.

2. *Электрофлотация.* При электролизе воды образуются пузырьки газа (на аноде — кислород, на катоде — водород). Они поднимаются вверх и захватывают с собой загрязнения. Если электроды растворимые, то процесс становится более эффективным благодаря образованию хлопьев коагулянта. Пузырьки газов мелкие, что повышает эффективность очистки сточных вод.

3. *Электроосмос.* Молекулы воды проходят через мембрану благодаря созданию разности потенциалов. Положительно заряженные частицы через полупроницаемый материал мембраны передвигаются к отрицательно заряженному электроду, в результате повышается их концентрация с одной стороны мембраны и возникают осмотические силы, способствующие перемещению воды.

4. *Электрофорез.* В электрическом поле, создаваемом в сточных водах, происходит перенос мелкодисперсных частиц. Отрицательно заряженные дисперсные фазы притягиваются к положительному электроду (аноду). Затем происходит их удаление из анодной зоны.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Потенциал энергосбережения и повышения энергетической эффективности отрасли водоотведения России огромен. Так, результаты обследования множества канализационных насосных станций (КНС) — главных канализационных станций (ГКНС) и районных станций города на Неве — показали, что перерасход энергопотребления КНС составляет 31–200% (табл. 13). Это обусловлено физическим износом и изменением режима поступления сточных вод. По указанным причинам, например, при гидравлической потребности районных КНС в электроэнергии 2 млн кВт·ч/год фактическая потребность составляет до 6 млн кВт·ч/год.

Таблица 13. Гидравлически требуемое и фактическое энергопотребление ГКНС и КНС Санкт-Петербурга

Показатели энергопотребления КНС	ГКНС			Районные КНС, 134 шт.
	ССА	ЦСА	ЮЗОС	
Гидравлическая потребность $W$ , млн кВт·ч/год	67	37	13	2
Фактическая потребность $W$ , млн кВт·ч/год	99	57	17	6
Перерасход энергии из-за износа, засоров, протечек, %	48	54	31	200

Примечания: ССА – Северная станция аэрации; ЦСА – Центральная станция аэрации;  
ЮЗОС – Юго-Западные очистные сооружения.

В целом основными направлениями, определяющими энергоэффективность процессов водоотведения, являются:

- перекачка сточных вод;
- биологическая очистка сточных вод.

#### **Энергопотребление процессов биологической очистки сточных вод.**

Текущие уровни потребления энергоресурсов технологических процессов очистки сточных вод и производства вторичной продукции на очистных сооружениях приведены в таблице 14.

В процессе очистки городских сточных вод основное потребление электроэнергии приходится на подачу сжатого воздуха (аэрация) в сооружения биологической очистки (аэротенки) с целью обеспечения растворения в иловой смеси необходимого количества кислорода, потребляемого бактериями в процессе разложения загрязнений. На это расходуется 60–80% общего потребления электроэнергии очистными сооружениями.

Таблица 14. Потребление энергоресурсов технологических процессов очистки сточных вод и производства вторичной продукции на очистных сооружениях

Энергопотребление	Расход на 1 м <sup>3</sup> очищенной сточной воды	
	Минимальный	Максимальный
Электроэнергия, кВт·ч	0,15	1,00
Топливо (или тепловая энергия), кг условного топлива	0,01	0,07

Энергопотребление зависит от следующих факторов:

- загрязненность сточных вод;
- технологические процессы очистки сточных вод и обработки осадков;
- глубина очистки;
- тип используемого оборудования;
- уровень автоматизации процесса.

В идеальном случае подача воздуха и, соответственно, расход электроэнергии должны быть пропорциональны поступлению со сточными водами загрязнений, на окисление которых расходуется кислород.

Учитывая то, что загрязненность сточных вод изменяется в очень широком диапазоне, данные по энергопотреблению соотносят не с кубическим метром сточной воды, а с килограммом суммы кислородокисляемых веществ (кислородный эквивалент, КЭ) в сточных водах. Идеальное потребление электроэнергии на подачу воздуха в зависимости от технологического процесса составляет 0,25–0,40 кВт·ч/кг КЭ.

Данные по энергопотреблению очистных сооружений городских сточных вод приведены в таблице 15. До 40% крупных очистных сооружений работает в энергоэффективном режиме с удельными расходами, близкими к расчетным параметрам. При этом 30% сооружений с расходами более 0,6 кВт·ч/кг КЭ нуждаются в улучшении технологии аэрации. В диапазоне проектной производительности 100–300 тыс. м<sup>3</sup>/сут около 35% сооружений работает с хорошими энергетическими показателями, однако перерасходы энергии для 30% сооружений более существенны.

Таблица 15. Удельное энергопотребление в процессе биологической очистки, кВт·ч/кг КЭ

Показатель	Проектная производительность, м <sup>3</sup> /сут		
	Более 300 тыс.	100–300 тыс.	Менее 100 тыс.
Диапазон	0,23–0,90	0,44–2,10	0,38–14,0
Среднее значение	0,52	0,6	1,37
Средний диапазон (±20% от среднего значения)	0,42–0,62	0,40–0,85	0,95–2,20
Теоретическая потребность	0,25–0,40		

Хуже выглядит картина энергоэффективности процесса очистки для станций производительностью менее 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Практически для большинства из них характерно высокое потребление энергии, причем значения могут на порядок и более отличаться от оптимальных параметров. Основная причина этого — невозможность уменьшить расход воздуха в условиях недогрузки станции.

#### *Повышение энергоэффективности процессов биологической очистки сточных вод*

Взаимосвязь нагрузки на станцию очистки сточных вод и расхода энергии представлена на рисунке 50. В условиях недогрузки ниже 25% от проектной мощности, когда необходимо оставить в работе менее одной воздуходувки, на ряде объектов возникают весьма значительные перерасходы энергии. Таким образом, для реализации существенного потенциала повышения энергоэффективности нужно устанавливать воздуходувки в соответствии с реальными расходами сточных вод.



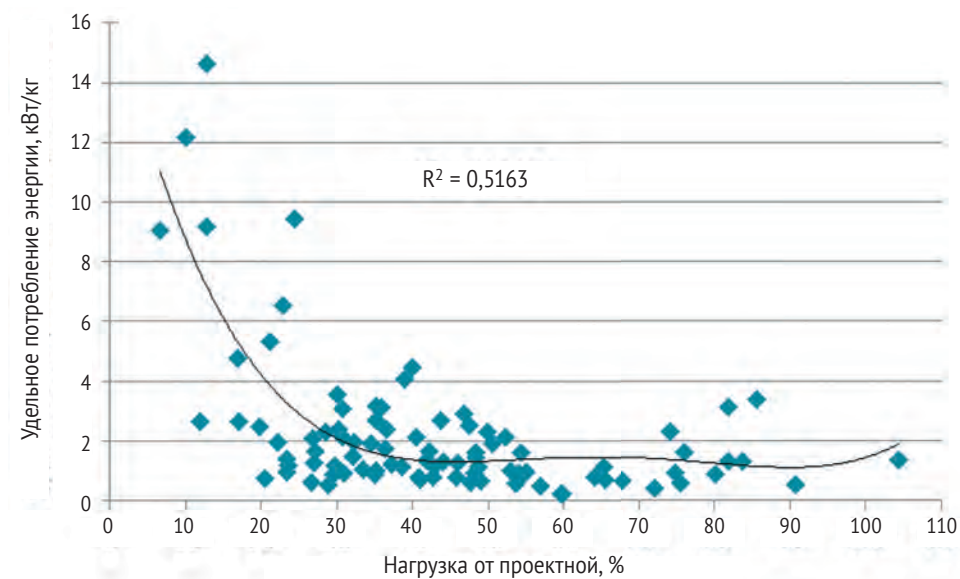


Рис. 50. Взаимосвязь удельного потребления энергии и нагрузки на станцию очистки сточных вод

Потенциал повышения энергоэффективности канализационных очистных сооружений (КОС) по отношению к очистным сооружениям хозяйственно-бытового стока колоссален. Для примера экономия по сравнению с обычными системами представлена в таблице 16.

Таблица 16. Экономия по сравнению с обычной технологией

Технология	кВт·ч/1000 м <sup>3</sup>
Эффективные насосы/двигатели	3–26
Энергоэффективные воздуходувки	26–40
Системы управления воздуходувками	13–46
Системы управления РК	13–26
Мелкопористые диффузоры	37
Сверхмелкопористые диффузоры	55
Системы АСУТП	0–40

Даже если рассматривать достаточно благополучные по энергопотреблению станции, то на современном уровне развития технологий отрасль располагает значительным резервом сокращения энергопотребления. Энергопотребление аэротенков имеет следующий потенциал снижения относительно средних значений (поэтапно, на фоне использования предыдущего мероприятия, т. е. величины не суммируются):

- 20–25% — за счет использования эффективных систем аэрации;

- 15–20% — за счет регулируемой подачи воздуха в соответствии с потребностью сооружений в кислороде;
- 10–15% — за счет применения энергосберегающих технологий.

С учетом важности подбора аэрации с целью энергоэффективности работы системы биологической очистки (рис. 51) можно проследить ступени совершенствования организации раскладки аэрационных систем для повышения их эффективности.

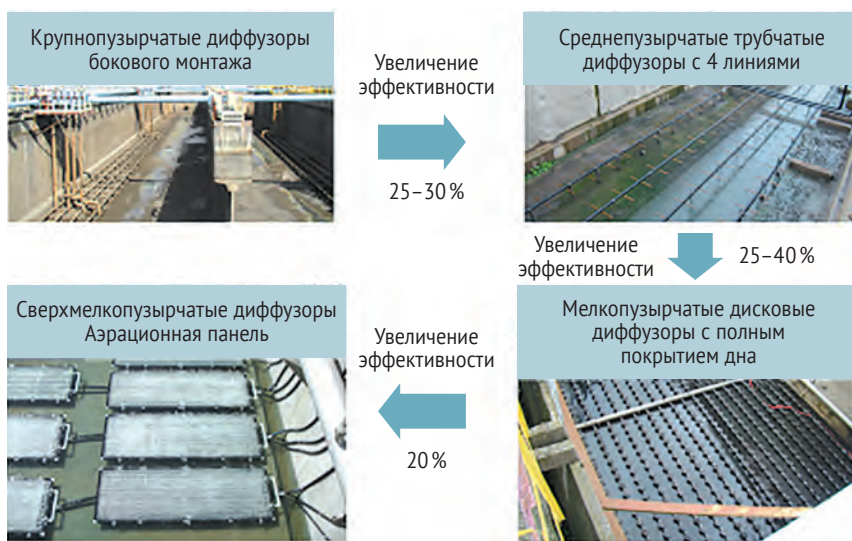


Рис. 51. Увеличение эффективности при изменении раскладок аэрационной системы

*Управление воздушным оборудованием.* Выбранное оборудование должно удовлетворять основным условиям:

- иметь высокий базовый КПД;
- диапазон управления подачей воздуха должен быть достаточно широк;
- КПД в диапазоне подач воздуха должен сохранять большие значения.

Энергосбережение достигается за счет разницы в потребляемой электроэнергии между управляемыми и неуправляемыми режимами подачи воздуха в аэротенки (рис. 52). Если использовать неуправляемые воздуходувки, то характеристика потребляемой электроэнергии (см. рис. 52, синяя линия) будет колебаться в зависимости от температуры (или плотности) воздуха в течение суток. Однако при использовании такого оборудования в любые сутки года количество потребляемой электроэнергии не должно превышать предусмотренной проектом величины (см. рис. 52, черная пунктирная линия)<sup>130</sup>.

<sup>130</sup> Энергосбережение как критерий выбора воздуходувки : журнал НДТ ВС и ВО. — 2012. — № 12.

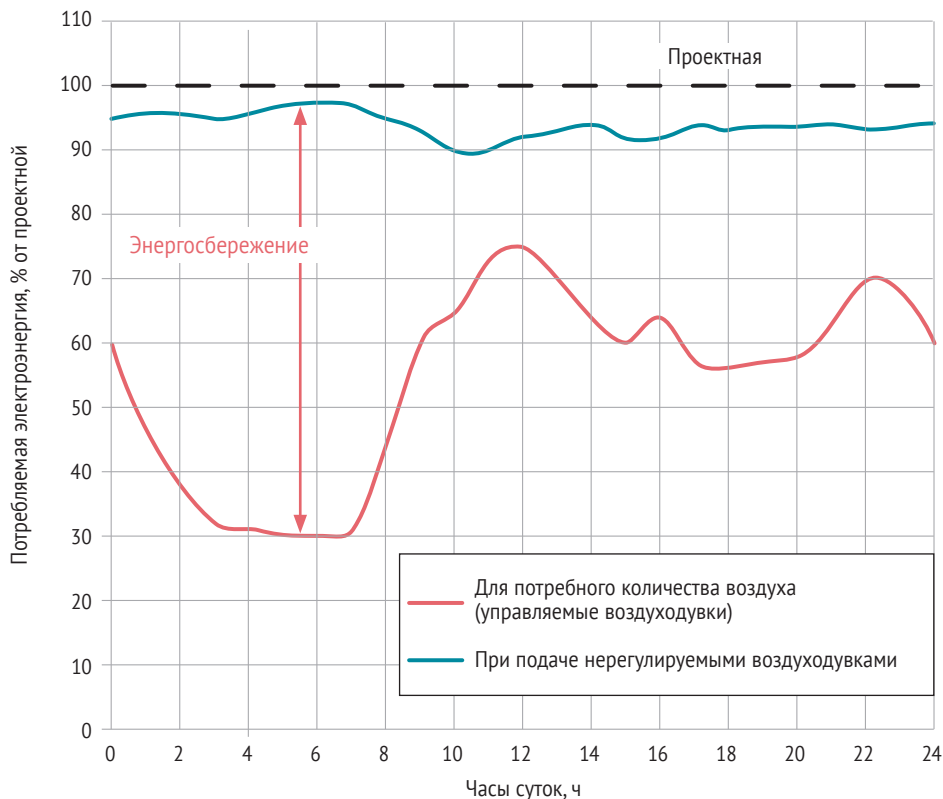


Рис. 52. Пример формирования процессов энергосбережения при использовании управляемых воздухонагнетателей по сравнению с нерегулируемыми агрегатами в течение выбранных суток, характеризующихся реальной неравномерностью изменения технологических нагрузок

При внедрении управляемых процессов в технологический проект проектировщику целесообразно подобрать управляемые воздухоудвки в соответствии с принципами воздействия: 1) использование преобразователя частоты тока (ПЧТ) в контуре регулирования; 2) применение оборудования с механическим изменением поворота выходного и/или входного направляющего аппарата. Количество сэкономленной электроэнергии — разница между двумя «кривыми»: синей и красной (см. рис. 52).

Представленный график (см. рис. 52) является реальным и типичным для суточной неравномерности колебаний технологической нагрузки. Получить его достаточно просто при эксплуатации очистных сооружений при наличии на объекте: 1) управляемых воздухонагнетателей; 2) контрольных технологических датчиков, связанных с автоматизированными системами управления технологическим процессом (АСУТП). Пока не оговариваем, насколько проект АСУТП должен быть детально проработан, поскольку «сливки» энергосбережения можно получить, используя достаточно примитивные решения.

Объемы воздуха, необходимые для биологической очистки на станциях аэрации, зависят от температуры и давления воздуха, что подвержено колебаниям на суточном и сезонном уровнях. Кроме того, плотность воздуха увеличивается при повышении давления, что делает необходимым учет барометрического давления или высоты над уровнем моря при проектировании аэрационных систем.

*Автоматизация процессов аэрации и воздухонагнетателей.* При внедрении АСУТП за счет оперативности реагирования повышается общая эффективность систем до 10%. Кроме того, автоматизация снижает потребность в трудовых ресурсах и оптимизирует процесс очистки.

Проектирование в современных условиях предполагает использование регулируемого или управляемого воздухоудувного оборудования, чтобы создать прецедент экономии электроэнергии, например, в периоды подач пониженных расходов воздуха. Щиты управления воздухоудвным оборудованием, как правило, выполняются независимо от панелей управления работой аэрационных систем. Связующим звеном общей системы АСУТП является наличие датчиков давления. Регулирование управляющими задвижками аэрационных систем с помощью технологических датчиков концентраций приводит к изменению давления в технологической системе, которое регистрируется датчиками давления.

Зарегистрированные отклонения давления в системе — один из основных сигналов, используемых воздухоудвным оборудованием для компенсации характеристик работы. Экономия энергии наиболее явно выражена, если воздухоудвное оборудование способно: 1) изменять подачу воздуха в широком диапазоне; 2) сохранять повышенный КПД во всем диапазоне.

Системы, требующие выполнения множества математических и последовательных операций, проще реализовать при использовании программируемых логических контроллеров (ПЛК). ПЛК обладают возможностью ввода управляющих зависимостей и необходимостью настройки ряда встроенных пропорционально-интегрально-дифференцирующих (ПИД) регуляторов.

В целом приборная база должна быть самодостаточной для поддержания процессов управления и не зависеть от работы компьютеров, вирусных атак и состояния средств связи. Приборы выполняют локальную задачу управления. Система управления должна решать задачи управления, сбора и передачи данных, расчетов и оптимизации. Программы оптимизации служат для получения «уставок», которые передаются для коррекции технологических параметров в приборы.

Для того чтобы обеспечить срочный энергосберегающий эффект от управляемых воздухонагнетателей, проект АСУТП может быть реализован достаточно быстро с сохранением порядка 90% эффективности по упрощенной схеме. В этом случае следует выбрать контрольный аэротенк (или ряд аэротенков) с усредненным технологическим оснащением и средневзвешенными показателями параметров очистки. Затем разместить в нем контрольные датчики. После обработки сигналов с датчиков АСУТП в соответствии с заложенной

логикой воздействует на электропривод главной задвижки воздуховода (или ряд заданных задвижек). Все остальное решается просто — регулирование воздухонагнетателей произойдет в автоматическом режиме по измерению давления в воздуховоде.

Процесс очистки сточных вод имеет большое социальное и экологическое значение и подлежит специальному государственному нормированию. Одним из основных нормативных документов, для проектирования системы водоотведения хозяйственно-бытовых сточных вод, в России является Свод правил (СП) 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения». Свод правил описывает порядок выбора и согласования мест размещения очистных сооружений, условия бесперебойной работы систем водоотведения. Он также содержит методику расчета расходов городских сточных вод, гидравлического расчета канализационных сетей, удельных расходов, коэффициентов неравномерности расходов сточных вод. В нем дается методика гидравлического расчета сетей, диаметров труб, скоростей потока в сетях, описание единиц оборудования на сетях, снегоплавильных камер. В Своде правил изложены требования к проектированию сооружений транспортировки и очистки сточных вод и обработки осадков. С учетом постоянного развития технологий транспортировки и очистки сточных вод периодически и в настоящее время проводится актуализация данного документа.

Вторым значимым документом для выбора технологий очистки сточных вод и соответствия применяемых технологий требованиям природоохранного законодательства стал информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям (ИТС НДТ 10-2019). Данный справочник является систематизированным сосредоточием всех технологий очистки сточных вод, обязательных к применению, классифицированных по применимости в зависимости от категорий очистных сооружений и водоемов-водоприемников. По результатам внедрения каждой технологии рассчитаны достигаемые параметры очистки сточных вод, которые легли в основу технологического нормирования сбросов сточных вод с очистных сооружений.

## СРАВНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Вопрос, какая технология очистки сточных вод наиболее эффективна, не может быть признан корректным. При выборе технологии необходимо учитывать как множество исходных данных о составе сточных вод, так и текущие требования экологического законодательства.

Оптимальным инструментом для оценки применяемых технологий очистки сточных вод является эколого-экономическая эффективность (ЭЭЭ) затрат жизненного цикла. В ИТС 10-2019 под этим термином подразумевается отношение экономических затрат на сокращение сбросов в водные объекты к экологическому результату, выраженному в комплексных единицах (интегральному показателю качества очистки, ИПКО).

### Механическая очистка

Правильно спроектированные и нормально работающие сооружения предварительной механической очистки обеспечивают эффективную работу последующих ступеней очистки сточных вод и обработки осадка. Отсутствие либо ненадлежащая работа сооружений предварительной механической очистки оказывает негативное воздействие на очистные сооружения в целом.

С учетом предъявляемых к технологическим этапам требований, а также внушительного разнообразия типов используемых решеток существуют не жесткие, но предпочтительные по подбору оборудования в зависимости от нагрузки и типа отбросов (наличие большого количества волокнистых включений или мелкого мусора и т. д.) разные варианты компоновки различных типов решеток (табл. 17).

Таблица 17. Сравнение наиболее распространенного оборудования для процеживания

Этап	Тип решеток	Принцип чистки	Глубина канала, м	Прозор решетки или размер отверстия, мм
Предварительное сороудаление	Стержневая	Возвратно-поступательный	2 и более	20–100
Промежуточное сороудаление	Изогнутая	Непрерывный	2–10	10–20
	Стержневая	Возвратно-поступательный	2–10	10–20
	Ленточная (реечная и перфорированная)	Непрерывный	2–6	10–20
Тонкое сороудаление	Стержневая	Возвратно-поступательный	2–6	4–10
	Ленточная (реечная и перфорированная)	Непрерывный	2–6	3–10
	Ступенчатая	Непрерывный	2–6	4–10
	Барабанная	Непрерывный	2–4	3–10
Процеживание	Барабанная	Непрерывный	–	1–3
	Устройство фильтрующее самоочищающееся	Непрерывный	–	1–3

Технологическая эффективность оборудования для процеживания практически неизмерима, так как содержание грубых включений в сточных водах не подвергается производственному контролю из-за практической невозможности адекватного отбора проб. Поэтому об эффективности оборудования судят по массе удержанных отбросов.

### *Обработка и отмыв грубых примесей, задержанных на решетках и ситах*

С учетом небольшого удельного веса отбросов, задерживаемых на решетках, предпочтительным методом их обработки до момента транспортировки в места утилизации является их прессование (обезвоживание)<sup>151</sup>.

Обезвоживание (прессование) с предварительной промывкой позволяет:

- сократить массу вывозимого отхода;
- обеспечить более высокую стабильность отхода (стойкость к загниванию);
- с промывной водой вернуть в основной процесс часть органики, необходимой для интенсификации процессов биологической очистки.

Одной из проблем является значительное количество органических веществ, которые содержатся в отбросах. Поэтому длительное размещение, особенно на местах образования, приводит к их гниению с выделением дурнопахнущих веществ. С целью устранения дурнопахнущих веществ отбросов, а также потенциального выделения органических веществ обратно в систему биологической очистки используют различные методы промывки. Перечень наиболее распространенного оборудования для отмывки и обезвоживания отбросов с решеток приведен в таблице 18.

*Таблица 18. Основные характеристики оборудования для отмывки и обезвоживания отбросов с решеток*

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики
Пресс для отбросов	Обезвоживание производится в перфорированном цилиндре с помощью поршня либо шнека	Уменьшение объема отбросов до двух раз
Пресс с камерой предварительной промывки	Перед подачей на обезвоживание отбросы отмываются технической водой (перемешиванием в закрытой емкости)	Практически полная отмывка отбросов от взвешенных веществ. Более глубокое обезвоживание отбросов

Организация тех или иных мероприятий, а также степень глубины обработки отбросов основывается на потребности технологии и системы утилизации отходов конкретного сооружения.

### *Песколовки*

Выделение грубых примесей (песка) необходимо для того, чтобы он не оседал в последующих сооружениях, препятствуя их работе. Неуловленный песок при наличии первичных отстойников оседает в них, а при их отсутствии — в сооружениях биологической очистки. При этом сооружение по удалению песка (песколовка) должно задерживать максимум песка и минимум органических загрязнений.

Так же, как и применительно к грубым примесям, измерение эффективности задержания песка не практикуется. Эта задача представляет собой сложность

<sup>151</sup> Технический справочник по обработке воды... Т. 2.

даже для исследовательских целей. Об эффективности задержания песка судят по содержанию песка в осадке первичных отстойников (если таковые имеются). Содержание песка, не создающее трудностей для эксплуатации, — не более 6% от сухого вещества осадка. Перечень наиболее распространенного оборудования для выделения песка из сточных вод приведен в таблице 19.

Таблица 19. Основные характеристики оборудования для выделения песка из сточных вод

Оборудование	Технологические характеристики
Горизонтальная песколовка	Эффективное удержание песчаной фракции, но высокое содержание в осадке мелких неорганических (глина и т. п.) и органических частиц. Сильная зависимость от скорости в сооружении (расхода). Необходимо специальное оборудование для сгребания песка. Применяется начиная со средних очистных сооружений
Горизонтальная песколовка с круговым движением воды	Эффективное удержание песка, но высокое содержание в нем органических и других минеральных частиц. Сильная зависимость от скорости в сооружении (расхода). Не требуется специального оборудования для сгребания песка. Однако рабочий объем, в котором непосредственно движется поток сточной воды, занимает всего около 15% строительного объема. Применяется в диапазоне малых–средних очистных сооружений
Аэрируемая песколовка	Использование воздуха позволяет не зависеть от скорости (расхода) воды. Пониженное содержание органики в песке. Максимальное выделение дурнопахнущих веществ из-за аэрации поступающей сточной воды. Нежелательна перед сооружениями биологического удаления фосфора. Применяется начиная с малых очистных сооружений, однако эффективность задержания песка в нижнем диапазоне невысокая и в целом ниже, чем у других конструкций
Тангенциальная (вихревая) песколовка	Компактное и эффективное сооружение. Применяется на сверхмалых и малых очистных сооружениях

#### Отстойники

В современных технологических схемах целью осветления является выделение из сточных вод оптимального количества взвешенных загрязнений для снижения нагрузки на стадию биологической очистки. Это позволяет уменьшить объем образующихся осадков и сократить до 30–50% затраты электроэнергии на процесс очистки в целом. В таблице 20 приведен перечень наиболее распространенного оборудования для осветления сточных вод.



Таблица 20. Основные характеристики оборудования для осветления сточных вод

Оборудование	Технологические характеристики
Отстойники. Применяется несколько конструкций на очистных сооружениях различного масштаба	Максимальная эффективность осаждения взвешенных веществ составляет 65–70 % (чем больше исходное содержание, тем выше эффективность). Снижение БПК <sub>5</sub> может достигать 50 %
Вертикальные отстойники	Простота эксплуатации: не требуется оборудование. Возможно залегание осадка на конических стенках днища. Высокая стоимость строительства вследствие большой глубины. Применимо только на очистных сооружениях с ПП от небольших и ниже
Горизонтальные отстойники	Максимальная технологическая эффективность, обусловленная более совершенной гидравликой. Максимальная компактность. Обязательно применение оборудования для сгребания осадка к приемкам. Более сложное и менее надежное оборудование, чем для радиальной конструкции. Применимы в широком диапазоне – от небольших до сверхкрупных ОС
Многоконусные отстойники	Относительно невысокая эффективность. Простота эксплуатации: не требуется оборудование. Возможно залегание осадка на конических стенках днища. Высокая стоимость строительства вследствие большой глубины и материалоемкости. Более широкая сфера применения по сравнению с вертикальными – от малых до средних ОС
Радиальные отстойники	Весьма высокая эффективность. Простое и достаточно надежное оборудование (илоскребы). Применимы от средних до сверхкрупных ОС

### Биологическая очистка

Основные варианты технологий очистки сточных вод для нового строительства и реконструкции очистных сооружений можно разделить на четыре группы:

- 1) классическая биологическая очистка;
- 2) технология с удалением азота и фосфора;
- 3) технология с удалением азота и фосфора, с доочисткой на фильтрах;
- 4) технология с удалением азота и фосфора, с доочисткой на биофильтрах и фильтрах, ориентированная на достижение предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного назначения (ПДК<sub>рыбхоз</sub>).

В таблице 21 рассмотрены варианты технологий очистки сточных вод для нового строительства и реконструкции очистных сооружений.

Таблица 21. Основные варианты технологий для нового строительства и реконструкции ОС

Номер варианта	Технология	Основные (минимально необходимые) технические мероприятия
<i>А. Новое строительство</i>		
A1	Полная биологическая очистка (БО) – новое строительство	Строительство новых сооружений механической и полной биологической очистки (включая аэротенки и вторичные отстойники)
A2	Биологическая очистка с удалением азота и фосфора (БНДФ)	Сооружения механической и полной биологической очистки (включая аэротенки и вторичные отстойники). Объем аэротенков – около 200% от БО, площадь вторичных отстойников – около 200% от БО
A3	Биологическая очистка с удалением азота и фосфора и с доочисткой на фильтрах	Строительство сооружений по А2 с блоком доочистки фильтрованием
A4	Биологическая очистка с удалением азота и фосфора и с многоступенчатой доочисткой от соединений азота и фосфора, БПК, взвешенных веществ	Строительство сооружений по А2 с биореакторами доочистки (от аммонийного и нитритного азота, при необходимости – от нитратов) и сооружениями доочистки фильтрованием
<i>Б. Реконструкция</i>		
B1	Полная биологическая очистка (БО)	Реконструкция (капитальный ремонт) существующих сооружений без изменения технологии, с заменой оборудования, для продления срока эксплуатации
B2	Биологическая очистка с удалением азота и фосфора (БНДФ)	Реконструкция сооружений, работавших по технологии БО, нагруженных не более 35–50% от проектного номинала (зависит от проектных параметров сооружений и загрязненности сточных вод). Выделение в аэротенке, как правило, трех разнородностей технологических зон. Установка мешалок в неаэрируемых зонах, насосов рециркуляции, прокладка, при необходимости, трубопроводов. Установка новой аэрационной системы в необходимых зонах*
B3	Биологическая очистка с удалением азота и фосфора (БНДФ) и доочистка от взвешенных веществ – как дополнительная стадия к существующим реконструированным сооружениям	Строительство сооружений доочистки на фильтрах
B4	Биологическая очистка с удалением азота и фосфора (БНДФ) и доочистка от соединений азота и фосфора, БПК, взвешенных веществ – как дополнительная стадия к существующим реконструированным сооружениям	Строительство многоступенчатых сооружений доочистки от соединений азота и фосфора, БПК, взвешенных веществ

\* Это мероприятие капитального ремонта, как правило, совмещаемое с реконструкцией.

\*\* Мероприятие, имеющее как технологическое, так и экономическое значение.

	Опциональные мероприятия (виды работ)	Применение реагентов
		Не требуются
		Необходимы по технологиям БНДХФ и БНДБХФ
		То же. Возможно применение флокулянта
		Коагулянт. Возможно применение флокулянта. Органический субстрат для денитрификации
		Не требуются
	Капитальный ремонт строительных конструкций, проходных мостков и замена ограждений. Реконструкция механической части вторичных отстойников и насосной станции возвратного ила. Реконструкция первичных отстойников (по назначению либо с использованием в качестве анаэробных зон, либо для преферментации осадка). Реконструкция сооружений грубой механической очистки. Замена воздуходувок с установкой регулируемых агрегатов**. Установка контрольно-измерительных приборов (КИП). Сооружения хранения, приготовления и дозирования раствора реагента для осаждения фосфатов (для схем БНДХФ и БНДБХФ)	Реагент (коагулянт) для осаждения фосфатов – только в схемах БНДХФ и БНДБХФ

Сравнение вариантов технологий проведено по методике расчета стоимости жизненного цикла (ЖЦ) и представлено в таблице 22 с упрощениями, применительно к очистным сооружениям городских сточных вод с притоком 100 тыс. м<sup>3</sup>/сут. За расчетный срок службы очистных сооружений (50 лет) будет очищено 1825 млн м<sup>3</sup> сточных вод. Указанная в графе 9 стоимость очистки является отношением всей учтенной совокупности затрат за жизненный цикл к общему объему очищенной воды.

Таблица 22. Сравнение вариантов технологий для нового строительства и реконструкции сооружений очистки сточных вод\*

Вариант технологий	Капитальные вложения, млн руб.			Удельные капитальные вложения, тыс. руб./м <sup>3</sup> в сутки	Текущие затраты в ходе работы ОС, млн руб.		Всего затрат на создание и работу ОС, млн руб.	Стоимость очистки** м <sup>3</sup> сточных вод, руб.
	Строительно-монтажные работы (СМР)	Оборудование	Всего		Учтенные*** эксплуатационные затраты	Затраты на реновацию оборудования в течение ЖЦ		
<i>А. Новое строительство</i>								
A1	1150	150	1300	13,0	275	400	1975	1,10
A2	1700	300	2000	20,0	400	550	2950	1,60
A3	1790	370	2160	21,6	500	810	3470	1,88
A4	1850	550	2400	24,0	1360	1210	4970	2,70
<i>Б. Реконструкция (и дополнение доочистки)</i>								
B1	250	150	400	4,0	275	400	1075	0,59
B2	400	300	700	7,0	400	550	1650	0,90
B3	490	370	860	8,6	500	810	2170	1,18
B4	550	550	1100	11,0	1360	1210	3670	2,00

\* При расчете не учтены демонтаж, банковский процент.

\*\* Из эксплуатационных затрат учтены только стоимость электроэнергии, реагентов и затраты на техническое обслуживание оборудования. Удаление фосфора для всех технологий принято биологическим методом, без использования реагентов. Применение реагентов учтено только для технологий А4 и Б4, на стадии доочистки. При удалении основного количества фосфора химическим методом на стадии биологической очистки дополнительные затраты составляют 0,45 руб./м<sup>3</sup>.

\*\*\* Это только часть эксплуатационных затрат, применяемых для целей анализа.

Для получения общей сравнительной оценки эффективности удаления загрязняющих веществ необходимо привести их количества к единой величине — интегральным показателям качества очистки (ИПКО) (табл. 23).

Эколого-экономическая эффективность (табл. 24) определялась двумя способами:

- как абсолютная — отношение стоимости очистки 1 м<sup>3</sup> по данной технологии к разнице между ИПКО исходной сточной воды и ИПКО очищенной воды для данной технологии;
- как относительная (относительно предыдущей по глубине очистки технологии), что позволяет выяснить, какой эффект имеет улучшение качества очистки с переходом от менее эффективной технологии к следующей, более эффективной.

Таблица 23. Интегральные показатели качества очистки (ИПКО)

Загрязняющие вещества	ИПКО исходной сточной воды	ИПКО очищенной воды при использовании технологий			
		№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Взвешенные вещества	40,0	3,0	2,0	2,0	1,0
БПК <sub>5</sub>	90,0	6,0	2,5	2,5	1,0
ХПК	24,0	4,0	2,7	2,7	2,0
Азот аммонийный солей	102,6	64,1	2,6	2,6	1,0
Азот нитратов	0	0,5	2,7	1,0	0,5
Азот нитритов	0	25,0	10,0	10,0	1,0
Фосфор фосфатов	25,0	17,5	17,5	3,5	1,0
ИПКО (суммарное значение)	281,6	120,2	40,0	24,2	7,6

Таблица 24. Определение эколого-экономической эффективности технологий

Расчетные показатели	Единицы измерения	Значения показателей для сточной воды				
		Исходной	Обработанной по технологии очистки			
			№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
ИПКО		281,6	120,2	40,0	24,2	7,6
Снижение ИПКО относительно исходной сточной воды (абсолютное снижение)		0	161,4	241,6		257,3
Снижение ИПКО относительно предыдущей (менее эффективной) технологии (относительное снижение)		0	161,4	80,2	15,8	16,6
<i>А. Новое строительство</i>						
Стоимость очистки (по графе 9 таблицы 22), абсолютное значение	руб./м <sup>3</sup>	0	1,1	1,6	1,9	2,7
Увеличение стоимости относительно предыдущей (менее эффективной) технологии	руб./м <sup>3</sup>	–	1,1	0,5	0,8	1,6
Эколого-экономическая эффективность:	руб./усл. кг удаленных загрязнений					
– абсолютная,		–	6,8	6,6	7,3	9,9
– относительная		–	6,8	6,0	17,8	49,3
<i>Б. Реконструкция</i>						
Стоимость очистки (по графе 9 таблицы 22), абсолютное значение	руб./м <sup>3</sup>	0	0,59	0,90	1,18	2,00
Увеличение стоимости относительно предыдущей (менее эффективной) технологии	руб./м <sup>3</sup>	–	0,59	0,31	0,28	0,82
Эколого-экономическая эффективность:	руб./усл. кг удаленных загрязнений					
– абсолютная,		–	3,70	3,70	4,60	7,60
– относительная		–	3,70	3,90	17,8	49,3

Общий вывод: оптимальная эколого-экономическая эффективность достигается при использовании наиболее эффективных технологий биологической очистки в аэротенках с удалением азота и фосфора (биологическим путем). Система нормирования должна обеспечивать безусловный приоритет мероприятий по внедрению технологий удаления азота и фосфора в аэротенках (и им подобных методов) по сравнению с доочисткой.

### *Обеззараживание сточных вод*

В современных условиях качество воды в естественных и искусственных поверхностных водоемах в значительной степени определяется качеством поступающих в них сточных вод от городов и населенных пунктов. Сточные воды оказывают существенное воздействие на микробиологическое состояние водных объектов.

В городских сточных водах обнаруживаются многие виды патогенных бактерий, вирусов и паразитов. Болезни, вызываемые этими микроорганизмами, могут приводить к серьезным последствиям для здоровья населения. Поэтому обеспечение качественного обеззараживания поступающих в водоемы очищенных сточных вод в настоящее время становится все более актуальной задачей. Для ее решения необходимо применение оптимальных современных методов. В качестве промышленных методов обеззараживания очищенных сточных вод в коммунальных системах канализации могут использоваться: обработка газообразным хлором и хлорпроизводными реагентами (гипохлоритом натрия, гипохлоритом кальция); озонирование; ультрафиолетовое облучение.

### *Озонирование*

Обеззараживание сточных вод озонированием применяется крайне редко. Так, в США этот метод используется менее чем на 4% очистных канализационных станций.

Озонирование не нашло практического применения и на очистных сооружениях РФ для обеззараживания коммунальных сточных вод, так как является весьма затратным методом, требующим как сложного комплекса оборудования, так и высоких энергозатрат.

Основными промышленными методами обеззараживания сточных вод, применяемыми во всем мире, являются хлорирование и обработка ультрафиолетовым излучением.

### *Обеззараживание хлорсодержащими реагентами*

Для обеззараживания хлорреагентами в подавляющем большинстве случаев используется один из двух реагентов — жидкий хлор (хлор-газ) или гипохлорит натрия.

Негативным свойством хлорирования является образование в сточных водах хлорорганических соединений и хлораминов, а также наличие остаточного хлора. Обеззараживание хлорированием при содержании остаточного хлора 1,5 мг/л, однако, не гарантирует необходимой эпидемиологической безопасности в отношении вирусов.

По данным многочисленных исследований в России и за рубежом, хлорорганические соединения обладают высокой токсичностью, мутагенностью и канцерогенностью, способны аккумулироваться в донных отложениях водоемов, тканях гидробионтов и по трофическим цепям попадать в организм человека. Эти соединения характеризуются высокой стойкостью к биодеструкции и вызывают загрязнения водных объектов на значительном расстоянии вниз по течению. Даже однократное загрязнение донных отложений может привести к постоянному локальному загрязнению водных организмов в течение длительного времени (до нескольких лет).

Хлорамины даже в очень низких концентрациях могут вызывать серьезные физиологические изменения гидробионтов вплоть до их гибели, что влечет за собой нарушение жизнедеятельности водоема в целом.

#### *УФ-обеззараживание*

УФ-обработка интенсивно внедряется в системах коммунальной канализации и в настоящее время является основным и практически единственным для новых очистных сооружений методом обеззараживания сточных вод в развитых странах мира — США, Западной и Восточной Европе, Южной Кореи, Китае, Австралии, Новой Зеландии и др.

Санитарно-технологические характеристики процесса обеззараживания сточных вод:

- незначительное время контакта УФ-лучей со сточными водами — бактерицидный эффект обеспечивается за время прохождения воды через камеру обеззараживания УФ-установок;
  - бактерицидный эффект, как правило, не сопровождается образованием опасных соединений, в том числе канцерогенных продуктов трансформации химических соединений в воде, что исключает опасность передозировки;
  - при воздействии УФ-излучения на сточные воды, содержащие органические соединения, обычно не происходит эмиссии в воздух летучих токсичных веществ;
  - отсутствие необходимости обезвреживания сточных вод;
  - отсутствие пролонгированного биоцидного эффекта, который мог бы оказать вредное действие на водную биоту;
  - отсутствие необходимости в хранении опасных материалов, реагентов<sup>132</sup>.
- В таблице 25 приведено сравнение основных технологий обеззараживания.

<sup>132</sup> МУ 2.1.5.732-99. Водоотведение населенных мест. Санитарная охрана водоемов.

Таблица 25. Сравнение технологий обеззараживания

Показатель	Обеззараживание УФ-излучением	Обеззараживание гипохлоритом натрия
<i>Производительность станции обеззараживания:</i>		
суточная максимальная проектная, м <sup>3</sup> /сут,	149 184	149 184
суточная средняя, м <sup>3</sup> /сут,	100 000	100 000
часовая максимальная, м <sup>3</sup> /ч	6216	6216
<i>УФ-станция</i>		
Тип УФ-системы	88МЛВ-36А350-М	–
Тип УФ-ламп	ДБ-350	–
Количество рабочих УФ-ламп, шт.	144	–
Установленная мощность одной УФ-лампы, кВт	0,375	–
Общая установленная мощность рабочего оборудования, кВт	54	–
Срок службы УФ-ламп, ч	12 000	–
Расход активной электроэнергии в год, кВт·ч	437 040	–
Количество заменяемых ламп в год, шт.	105	–
Стоимость 1 кВт·ч активной электроэнергии, руб.	3,3	–
Стоимость одной УФ-лампы, руб.	7500	–
Стоимость активной электроэнергии в год, руб.	1 442 232	–
Стоимость заменяемых УФ-ламп в год, руб.	787 500	–
<i>Станция обеззараживания с использованием гипохлорита натрия</i>		
Активность реагента, %	–	17
Доза по чистому продукту, г/м <sup>3</sup>	–	3
Доза по товарному продукту, г/м <sup>3</sup>	–	17,7
Установленная электрическая мощность, кВт	–	14,6
Расход реагента по товарному продукту в год, т	–	646,05
Расход активной электроэнергии в год, кВт·ч	–	127 896
Стоимость 1 т товарного продукта марки А (ГОСТ 11086-76) на заводе-изготовителе, руб.	–	9300
Стоимость 1 кВт·ч активной электроэнергии в год, руб.	–	3,3
Стоимость активной электроэнергии в год, руб.	–	422 057
Стоимость гипохлорита натрия в год, руб.	–	6 008 265
<i>Станция дехлорирования с использованием тиосульфата натрия</i>		
Активность реагента, %	–	98
Доза по чистому продукту (1,5 г/мл хлора ← 0,9 = 1,35), г/м <sup>3</sup>	–	1,35
Доза по товарному продукту, г/м <sup>3</sup>	–	1,38
Расход реагента по товарному продукту в год, т	–	50,37
Стоимость 1 т реагента на заводе-изготовителе, руб.	–	21 850
Стоимость тиосульфата натрия, руб.	–	1 100 585
Годовые эксплуатационные расходы, руб.	2 229 732	7 530 907
Годовой экономический эффект, руб.	5 301 175	–



## ОТХОДЫ И ВТОРИЧНЫЕ РЕСУРСЫ

## Технологии обработки осадков сточных вод

Вода — наиболее используемый ресурс жизни как для хозяйственно-бытовых нужд населения, так и в различных отраслях промышленности: пищевой, медицинской, целлюлозно-бумажной, текстильной, машиностроительной и др. (рис. 53).



Рис. 53. Графическое представление жизненного цикла воды

Большая часть использованной воды поступает в виде сточных вод на очистные сооружения населенных пунктов или промышленных предприятий. Сточные воды населенных пунктов представляют собой комбинацию бытовых сточных вод, сточных вод бань, прачечных, ресторанов, автомоек, различных предприятий. Сточные воды могут содержать разнообразные по составу органические компоненты (например, бытовые отходы, фекалии, растительные масла, нефтепродукты, волокна растений и т. п.), минеральные компоненты (в том числе такие как песок, глинистые частицы, масла, кислоты, щелочи, соли и т. п.), токсичные химические вещества (включающие в себя соли тяжелых металлов, цианиды и т. п.), а также патогенные микроорганизмы, вирусы, яйца гельминтов, дрожжевые и плесневые грибы, водоросли и т. п. В связи с неоднородностью состава сточных вод выделяемые при их очистке осадки могут существенно различаться по своему составу и свойствам.

Очистка сточных вод представляет собой сложный процесс, по стоимости почти в два раза превышающий стоимость очистки природных вод. Из общей стоимости очистки сточных вод примерно 40–50% приходится на обработку осадков и подготовку их к утилизации. Осадки сточных вод — суспензии, выделяемые из сточных вод в процессе их механической, биологической и физико-химической (реагентной) очистки.

В зависимости от типа сооружений, применяемых для очистки сточных вод и обработки осадков, последние можно подразделить на следующие виды: грубые примеси (отбросы), задерживаемые решетками; тяжелые примеси (песок), задерживаемые песколовками; плавающие примеси (жировые вещества), всплывающие в отстойниках; сырой осадок — суспензия, включающая в себя в основном оседающие взвешенные вещества, которые задерживаются первичными отстойниками; активный ил, задерживаемый во вторичных отстойниках, — комплекс коллоидного типа, состоящий из микроорганизмов с адсорбированными и частично окисленными загрязнениями, извлеченными из сточных вод в процессе биологической очистки; осадок, анаэробно сброженный в осветлителях-перегнвателях, двухъярусных отстойниках и метантенках (анаэробному сбраживанию может подвергаться осадок, содержащий органические вещества, либо его смесь с избыточным активным илом); аэробно стабилизированный активный ил или его смесь с осадком из первичных отстойников в сооружениях типа аэротенков; сгущенный или уплотненный активный ил либо осадок в сгустителях или уплотнителях; осадок, обезвоженный на механических аппаратах; осадок, подсушенный на иловых площадках; осадок, термически высушенный в различных сушилках<sup>133</sup>.

На очистных сооружениях промышленных предприятий образуются осадки и шламы (минерального происхождения) производственных сточных вод. Количество, влажность, плотность и химический состав осадков и шламов производственных сточных вод колеблются в широких пределах.

Отбросы, снимаемые с решеток, включают в себя тряпки, банки, пластмассовые изделия, листья и т. п. Количество отбросов, снимаемых с решеток, зависит от типа решетки и ширины зазоров. Для решеток с шириной зазоров 16–20 мм в среднем оно составляет 8 л/год на 1 человека при влажности 80 % и плотности 750 кг/м<sup>3</sup>. Дробленые отбросы, разбавленные водой в количестве 40 м<sup>3</sup> на 1 т, направляются в сточную воду перед решетками или в метантенки. Отбросы с решеток допускается направлять на свалки или мусоросжигательные установки.

Тяжелые примеси (песок), задерживаемые в песколовках в количестве 0,02 л/сут на 1 человека при влажности 60 % и плотности 1,6 т/м<sup>3</sup>, направляются на песковые площадки или в накопители.

Плавающие примеси, количество которых в среднем составляет 2 л/год на 1 человека при влажности 60 % и плотности 0,6 т/м<sup>3</sup>, допускается обрабатывать совместно с осадком из первичных отстойников либо подсушивать и закапывать в землю, или сжигать.

Методы обработки, объемы, состав и свойства осадков из первичных и вторичных отстойников зависят от состава очищаемых сточных вод и в первую очередь от вида, количества и состава производственных сточных вод, очищаемых на городских очистных сооружениях совместно с бытовыми сточными водами. Количество осадка, выгружаемого из первичных отстойников, зависит от эффекта осветления сточных вод.

<sup>133</sup> Карагезов Ф. Г. Обезвоживание осадков сточных вод : автореф. ... канд. техн. наук. 05.23.04. — М., 1989.

Количество избыточного активного ила и его состав зависят от состава сточных вод и типа очистных сооружений, применяемых для их очистки. Наиболее часто для биологической очистки сточных вод применяются аэротенки различных типов: с продленной аэрацией, аэротенки-смесители, аэротенки-вытеснители, аэротенки-осветлители с рассредоточенным впуском сточных вод, башенного типа и др. Для удаления фосфора могут применяться аэротенки с добавлением сернокислого железа (симультанное осаждение), для удаления азота могут использоваться процессы нитрификации-денитрификации. Сооружения могут включать в себя помимо вторичных отстойников также третичные отстойники.

### Источники осадков сточных вод

Одна из наиболее сложных проблем, связанных с функционированием очистных сооружений (рис. 54), — управление образующимися осадками, которые являются одним из видов крупнотоннажных отходов. Рассмотрим основные способы обработки осадков сточных вод с целью уменьшения их объема при хранении и возможности их использования в различных отраслях.

Источниками образования отходов, получаемых при очистке сточных вод, являются сооружения механической и биологической очистки.

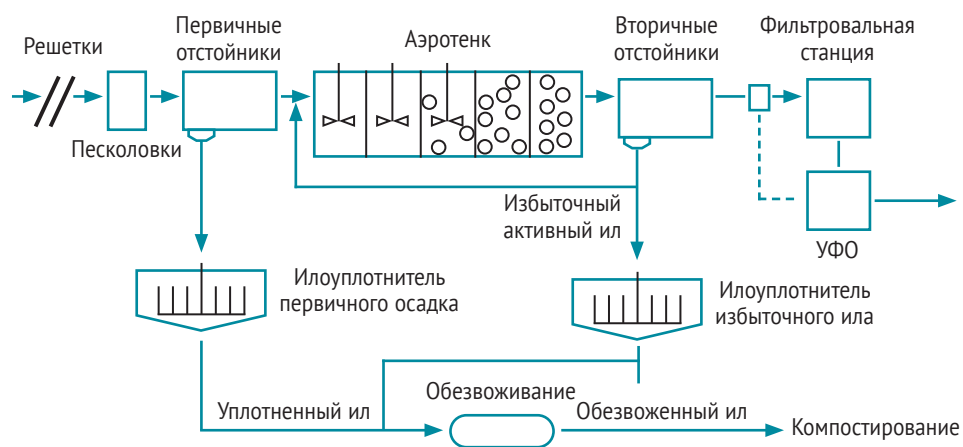


Рис. 54. Схема очистки сточных вод

При функционировании сооружений механической очистки на решетках, ситах и сетках задерживаются и удаляются отбросы различного состава; из песколовок удаляются примеси, состоящие преимущественно из песка; в первичных отстойниках образуется осадок, состоящий из органических примесей, осаждаемых из сточных вод. В ряде случаев как отдельный вид отходов выделяют всплывающие вещества из песколовок и первичных отстойников, которые в основном представляют собой жировые примеси. При обработке производственных сточных вод на сооружениях механической очистки могут выделяться и другие виды примесей, состав которых определяется видом технологических процессов, где такие сточные воды образуются.

Основным видом отходов на сооружениях биологической очистки является избыточный активный ил, представляющий собой прирост биомассы микроорганизмов в процессе биохимического окисления органических загрязняющих веществ<sup>134</sup>.

***Способы обработки отходов, получаемых при механической очистке сточных вод на решетках и в песколовках***

1. Обработка отходов, образующихся на решетках.

Отбросы с решеток (рис. 55) представляют собой крупноразмерные примеси, которые задерживаются при процеживании сточных вод через решетки, сетки, сита и подобные сооружения. Количество отбросов, задерживаемых на решетках, зависит от следующего:

- вида сточных вод;
- ширины прозоров решетки;
- наличия решеток на канализационных насосных станциях, с которых сточные воды перекачиваются на очистные сооружения.



Рис. 55. Этап механической очистки. Решетки

Обработка таких отходов заключается в их удалении из решеток, временном хранении на территории очистных сооружений с последующим удалением на захоронение. Для снижения объема отбросов и влажности перед выгрузкой в контейнеры производится их отжим на прессах, а также отмывка. Еще одно направление в обработке отбросов, поступающих на очистные сооружения, основано на их измельчении с применением различного типа дробилок

<sup>134</sup> Обработка и утилизация осадков городских сточных вод : учебник / Э. П. Доскина и др. — М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019.

и измельчителей. При использовании дробилок измельчение отбросов может производиться двумя путями:

- 1) отбросы измельчаются в потоке сточных вод до установки решеток;
- 2) отбросы, задержанные на решетках, сначала подаются на устройства для измельчения, а затем сбрасываются в поток сточных вод после решеток или подаются на сооружения для обработки осадка.

Выбор технологии обработки отбросов осуществляется с учетом различного рода технических требований и затрат на организацию процесса:

- измельчение отбросов характеризуется существенным энергопотреблением, в связи с чем непосредственное удаление задержанных на решетках отбросов считается более экономичным способом;
- применение дробилок позволяет направить измельченные отбросы на переработку вместе с осадком первичных отстойников и избыточным активным илом и, таким образом, применять технологические приемы с высокой степенью механизации и автоматизации, а также исключить отдельный цикл, связанный с размещением и транспортом отбросов.

## 2. Обработка отходов, образующихся в песколовках.

Песок из песколовок представляет собой осадок, состоящий преимущественно из минеральных примесей с включениями органических веществ. Песколовки рассчитываются на задержание песка крупностью более 0,25 мм, что обеспечивается осаждением примесей при скорости потока сточных вод в песколовке 0,15–0,30 м/с.

Содержание органических веществ в осадке аэрируемых песколовок ниже, чем в других типах песколовок, из-за отмывки примесей при винтовом движении потока сточных вод, который создается за счет аэрации. Обезвоживание задержанного песка производится после его удаления из песколовок на песковых площадках<sup>135</sup> или в других специальных сооружениях.

После обезвоживания песок из карт периодически удаляется. Учитывая, что песок, выгружаемый из песколовок, представляет собой смесь, включающую в себя органические примеси, для очистки песка можно применять специальные устройства для его отмывки, классификации, обезвоживания. После обработки песок может использоваться как материал для различных земляных работ<sup>136</sup>.

### ***Обработка осадка первичных отстойников и избыточного активного ила: способы и технические решения***

Отходы, удаляемые с решеток и песколовок, составляют относительно небольшую часть от всего количества осадка сточных вод, основная масса которого образуется в первичных и вторичных отстойниках.

<sup>135</sup> Песковые площадки — сооружения для обезвоживания песка из песколовок в виде земляных карт с ограждающими валиками высотой 1–2 м, оборудованные водосборными для отвода отстоявшейся воды.

<sup>136</sup> СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.

Основное внимание направлено на решение проблем, связанных с обработкой и конечным использованием осадка и избыточного активного ила. Выбор технологии обработки и конечного использования осадка сточных вод на конкретных очистных сооружениях формируется в зависимости от следующего:

- мощности очистных сооружений и места их размещения;
- доступности транспортной инфраструктуры;
- применяемой технологии очистки и состава сточных вод;
- законодательно-нормативных ограничений в отношении конечного использования осадка;
- доступности реагентов (коагулянтов, флокулянтов);
- возможности передачи осадка другим предприятиям и т. п.

Для реализации стратегии управления осадком очистных сооружений используются определенные способы его обработки: уплотнение, стабилизация, обеззараживание, кондиционирование, обезвоживание, сушка, термическое разложение органических веществ осадка, сжигание и т. д. Данные способы обработки применяются в различных комбинациях с учетом цели обработки и объемов обрабатываемого осадка.

### *Уплотнение осадка сточных вод*

Уплотнение осадка выполняется для предварительного снижения его влажности перед стабилизацией или обезвоживанием. Влажность осадка первичных отстойников сточных вод составляет в среднем 96,5–98,0%, влажность избыточного активного ила — 99,2–99,6%. Если на обработку подается смесь осадка первичных отстойников и избыточного активного ила, то влажность этой смеси характеризуется средними значениями в диапазоне 96,5–99,6%.

Снижение влажности осадка при уплотнении обеспечивает уменьшение его объема, что, в свою очередь, позволяет уменьшить объемы технологических емкостей на последующих ступенях обработки по сравнению с сооружениями, где предварительное уплотнение не производится. Для снижения влажности осадка применяются гравитационные и динамические (механические) илоуплотнители.

### *Гравитационное уплотнение*

На гравитационных илоуплотнителях снижение влажности избыточного ила и осадка производится путем использования процесса осаждения при относительно незначительных затратах энергии. Конструктивное исполнение илоуплотнителей аналогично вертикальным и радиальным отстойникам, которые представляют собой резервуары круглой формы диаметром 8–20 м. Радиальные илоуплотнители могут оснащаться специальными стержневыми мешалками, которые представляют собой решетчатые конструкции, перемешивающие осадок при вращении илоскреба. Преимущества такого перемешивания заключаются в следующем: а) происходит укрупнение частиц осадка, что интенсифицирует процесс их осаждения; б) образуются вертикальные каналы в осадке, по которым выделяющаяся иловая вода поднимается к верхним слоям в илоуплотнителе, что ускоряет отделение иловой

воды от осадка. Продолжительность гравитационного уплотнения составляет 10–16 ч в вертикальном илоуплотнителе и 5–15 ч — в радиальном (рис. 56). При этом влажность осадка в вертикальном илоуплотнителе достигает 98 %, в радиальном — 97,0–97,3 %.

Для интенсификации процесса уплотнения избыточного активного ила или его смеси с осадком могут применяться флокулянты. Их использование позволяет достичь большего снижения влажности обрабатываемого осадка с 97 до 92 %<sup>137</sup>.



Рис. 56. Гравитационные илоуплотнители (радиальные)

#### *Динамическое уплотнение*

При применении динамических илоуплотнителей обработка избыточного ила и осадка производится путем использования процессов флотации, процеживания, центрифугирования. Обработка с использованием динамических илоуплотнителей обычно применяется не только для уплотнения избыточного ила, но и для сгущения осадка первичных отстойников или смеси осадка с избыточным илом.

При флотационном сгущении активного ила, как правило, применяется метод напорной флотации при непосредственном насыщении воздухом активного ила или с насыщением рециркулирующей части осветленной воды после вторичных отстойников. В отличие от гравитационного уплотнения продолжительность обработки снижается до 3–4 ч с достижением влажности уплотненного активного ила 94,5–96,5 %. В последнее время также широко применяется уплотнение осадка с использованием различного механического

<sup>137</sup> Новикова О. К. Обработка осадков сточных вод : учеб.-метод. пособие. — Гомель, 2015.

оборудования (рис. 57): барабанных, дисковых, шнековых, ленточных уплотнителей, центрифуг<sup>138</sup>. При механическом уплотнении требуется использование флокулянтов, и эксплуатация механических илоуплотнителей сопряжена с большими затратами энергии, особенно при применении центрифуг. Вместе с тем такая обработка значительно сокращает продолжительность процесса уплотнения и позволяет снизить влажность уплотненного осадка с 97 до 93%. В большинстве случаев механическое уплотнение применяется на крупных очистных сооружениях с анаэробным сбраживанием осадка. Это позволяет загружать осадок с более высоким содержанием сухого вещества, что сокращает расход энергии при нагреве осадка при подаче в метантенк.

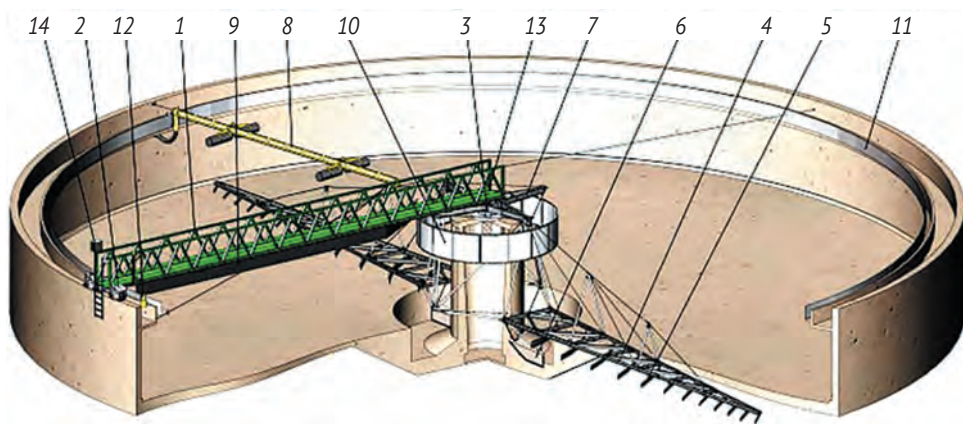


Рис. 57. Общий вид и принципиальное устройство илоскреба ЭИРП:

- 1 – вращающийся мост; 2 – приводная тележка; 3 – опорно-поворотный узел моста и рамы подвески скребковых крыльев; 4 – скребковые крылья; 5 – скребки периферийные; 6 – скребки прямая; 7 – рама подвески скребковых крыльев; 8 – притапливаемая труба сбора плавающих веществ; 9 – полупогружной скребок сбора плавающих веществ; 10 – направляющий цилиндр; 11 – полупогружная доска; 12 – кромкоочиститель (опция); 13 – центральный кольцевой токоприемник; 14 – шкаф управления илоскребом ЭИРП

В качестве илоуплотнителей применяют вертикальные и радиальные отстойники<sup>139</sup>. В них может поступать избыточный активный ил с концентрацией 5–8 г/л из вторичных отстойников или смесь активного ила с очищенной сточной жидкостью из аэротенков. Вторичные отстойники могут служить одновременно и илоуплотнителями. Для этого продолжительность отстаивания в них увеличивается в 2,0–2,5 раза (3–4 ч). При таком уплотнении избыточного активного ила отпадает необходимость в его перекачке из вторичных отстойников, а следовательно, сокращается расход электроэнергии.

Недостатком этого способа является увеличение объема вторичных отстойников.

<sup>138</sup> *Благодарумова А. М.* Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод : учеб. пособие. — Ч. 1. — Новокузнецк, 2010.

<sup>139</sup> *Ботук Б. О., Федоров Н. Ф.* Канализационные сети и сооружения. — М., 1977.



Таблица 26. Основное оборудование для уплотнения и сгущения осадка

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики
Уплотнители избыточного активного ила (осадков)	Избыточный активный ил (или иные варианты осадков) в условиях гравитационного уплотнения в проточном (как правило) уплотнителе разделяется на уплотненный осадок и сливную воду. Последняя переливается через водослив. Осадок уплотняется на дне сооружения и затем отводится на обработку	Достигается содержание сухого вещества до 30 кг/м <sup>3</sup> для избыточного активного ила, до 60 кг/м <sup>3</sup> для осадка первичных отстойников и промежуточные значения при уплотнении их смеси
Механические сгустители избыточного активного ила (осадков)	Избыточный активный ил (осадок) обрабатывается флокулянтom и подвергается сгущению либо путем гравитационного стекания отделившейся воды на фильтрующих лентах (вращающихся ситах), либо в центробежном поле (в сгущающих центрифугах)	Достигается содержание сухого вещества до 60 кг/м <sup>3</sup>
Флотационные сгустители избыточного активного ила	Избыточный активный ил смешивается с рабочей жидкостью (иловой водой), предварительно подвергнутой насыщению воздухом под давлением. Образующиеся при выделении растворенных газов пузырьки воздуха флотируют частицы активного ила к поверхности сооружения, где они собираются скребковым механизмом. Иловая вода отводится	Достигается содержание сухого вещества до 60 кг/м <sup>3</sup>

Выбор варианта уплотнения избыточного активного ила производится на основе технико-экономических и санитарных требований. Выбор оборудования для уплотнения и сгущения осадков сточных вод (табл. 26) имеет важное значение и подробно описан в информационно-техническом справочнике наилучших доступных технологий «Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения Поселений, городских округов» (ИТС НДТ 10-2019).

#### *Стабилизация осадка сточных вод*

Стабилизация осадка сточных вод достигается путем разложения органических примесей до более простых соединений или получения продуктов, имеющих более длительный период деструкции в окружающей среде. Стабилизация осадка проводится с использованием биологических, физико-химических методов, а также их комбинаций. Выбор метода стабилизации определяется рядом условий и зависит в том числе от вида осадков, их количества, возможностей и условий дальнейшего использования или размещения. В настоящее время наибольшее распространение получили биологические методы стабилизации в аэробных и анаэробных условиях. Аэробная стабилизация является более простой в сравнении с альтернативными методами, однако характеризуется значительным энергопотреблением и отсутствием выработки биогаза. Стабилизация осадка в анаэробных условиях — процесс более сложный, требующий применения ряда специальных устройств и оборудования.

### 1. Процесс стабилизации в аэробных условиях.

В используемой в отечественной практике технологии обрабатываемый осадок подается в аэрируемые тем или иным способом емкости (как правило, аналогичные аэротенкам, используемым для очистки сточных вод от органических загрязнений), в которых при температуре 14–25° С (соответствует температуре сточных вод, с учетом процессов теплообмена зимой) происходит аэробный процесс окисления органического вещества осадка первичных отстойников (при совместной стабилизации осадков) биомассой активного ила и самоокисление этой биомассы. Применяется также аэробная стабилизация только ила (когда не используется первичное осветление либо осадок первичных отстойников обрабатывается по другой технологии). Время стабилизации зависит от концентрации обрабатываемых осадков. Обработанный осадок самотеком выгружается из стабилизатора.

Данный метод позволяет разложить (окислить) нестабильное органическое вещество осадка, предотвращая разложение в окружающей среде, которое требует большого количества кислорода при окислении в почве, выделяет неприятно пахнущие вещества при захоронении либо ином складировании. Однако эффективность разложения органического вещества не превышает 60% от показателей анаэробного сбраживания. Уменьшение количества сухого вещества осадка приводит к сокращению его объема, размещаемого в окружающей среде.

Аэробная стабилизация — очень энергоемкий процесс, требующий большого расхода электроэнергии. Энергозатраты не могут быть рекуперированы. При этом метод не обеспечивает требуемой для почвенной утилизации степени обеззараживания осадков, включая дегельминтизацию.

Метод трансформирует часть твердого вещества с образованием углекислого газа (отдувается с воздухом, выходящим из сооружения, т. е. в составе газовой фазы) и воды. Таким образом, единственным экологически значимым массовым продуктом трансформации твердой фазы является углекислый газ. При достаточной аэрации выделение загрязняющих и дурнопахнущих веществ невелико, а при недостатке кислорода развиваются гнилостные процессы, и выделение дурнопахнущих веществ существенно возрастает. Выделяющиеся при разложении азот и фосфор переходят в жидкую фазу (в иловую воду). Выделение в жидкую фазу азота не превышает 10% от входящей нагрузки на очистные сооружения, фосфора — 5–10%.

Технически метод применим для сооружений любой производительности, но требует максимальной площади на территории очистных сооружений из всех технологий стабилизации осадка (кроме длительной стабилизации за счет вылеживания на площадках хранения). Кроме того, метод требует значительных емкостей стабилизаторов — приблизительно половину объема аэротенков для биологической очистки. При использовании этого метода затраты на электроэнергию на очистных сооружениях увеличиваются не менее чем на 30–60% (большее значение — для совместной стабилизации осадка первичных отстойников и ила). Вместе с тем сооружения безопасны и просты в эксплуатации.

2. Процесс стабилизации в анаэробных условиях: сооружения, режимы, особенности.

Принцип анаэробной обработки осадка предполагает использование процессов метанового брожения, которые осуществляются в специальных сооружениях — метантенках (рис. 58). Выделяющийся при обработке газ с большим содержанием метана сжигается для получения тепла либо используется как топливо после разделения метана и углекислого газа (т. е. при получении био-метана) в двигателях внутреннего сгорания для привода электрогенераторов. Получение электроэнергии при обработке осадка сточных вод давно стало обычной практикой для ряда стран, поскольку метантенки<sup>140</sup>, являющиеся неотъемлемым элементом многих крупных сооружений биологической очистки, позволяют существенно снизить совокупные затраты на эксплуатацию очистных сооружений и переработку осадков.



Рис. 58. Метантенки

Сбраживанию подвергают, как правило, смесь осадков первичных отстойников и избыточного активного ила, реже — только осадок первичных отстойников (при использовании отдельной технологии для избыточного активного ила) либо только избыточный активный ил (при очистке сточных вод без первичного осветления).

Типично обрабатываемый осадок подается в закрытые метантенки с перемешиванием, в которых происходит анаэробный (бескислородный) процесс распада части органического вещества осадка с получением смеси метана и углекислого газа. Процесс требует поддержания определенной температуры. Выделяют два диапазона температур — мезофильный (33–38° С) и термофильный (50–55° С). Время обработки составляет 12–30 сут в мезофильном и 6–12 сут

<sup>140</sup> Метантенки — надземные, реже подземные, железобетонные или стальные резервуары с теплоизоляцией для поддержания в них постоянной температуры. В полости метантенка размещаются устройства для перемешивания смеси и ее нагрева.

в термофильном режиме. Обработанный осадок удаляется из метантенка путем откачки насосами либо самотеком по трубам.

На эффективность перемешивания осадка и газовыделение большое влияние оказывает форма реакторов. Наибольшее распространение получили цилиндрические метантенки с плоским или конусным дном и крышкой, а также сооружения яйцевидной формы. Выбор режима сбраживания в анаэробных условиях имеет важное значение. В зарубежной практике все больше распространяются методы повышения эффективности метаногенного сбраживания путем предобработки сбраживаемого материала (тепловой обработки, УЗ-обработки и др.). В отечественной практике референц-объекты такого рода отсутствуют.

Режим термофильного сбраживания характеризуется более высокими интенсивностью и степенью деструкции органических веществ; кроме того, достигается более высокая степень санитарной безопасности обработанного осадка; однако такой режим применяется реже, чем мезофильный, из-за значительного потребления тепла, низкой стабильности процесса и проблем с обработкой осадка после сбраживания. В результате метантенки с мезофильным режимом обработки являются сегодня стандартным вариантом при проектировании систем обработки осадка с анаэробной стабилизацией.

На процесс анаэробного сбраживания влияет свойство обрабатываемого осадка. Осадок первичных отстойников легче подвергается сбраживанию и характеризуется большим выходом биогаза, чем избыточный ил, состоящий из биомассы микроорганизмов. Поэтому при анаэробной стабилизации осадка предпочтительны схемы очистки с первичным отстаиванием сточных вод в сравнении со схемами обработки, где первичные отстойники исключены.

Данный метод является одним из наиболее благоприятных для окружающей среды процессов, используемых в коммунальном водоотведении. Он позволяет трансформировать в биогаз нестабильное органическое вещество осадка, которое в противном случае разлагается в окружающей среде, требуя большого количества кислорода (при окислении в почве) либо выделяя неприятно пахнущие вещества (при захоронении либо ином складировании). Выделенный в процессе сбраживания биогаз представляет собой ценное топливо, эффективная утилизация которого (наряду с другими инженерными решениями) позволяет не только обеспечить нужную температуру в метантенках, но и обеспечить выработку энергии, на 50–70% (до 100%) покрывающей затраты сооружений очистки сточных вод на аэрацию. При этом в результате сжигания биогаза экономится природное топливо, уменьшается количество сухого вещества и объем осадка, размещаемого в окружающей среде, а различные химические и физико-химические процессы, происходящие в анаэробных реакторах, приводят к связыванию большей части тяжелых металлов в нерастворимые или малорастворимые соединения, в том числе сульфиды.

При термофильном сбраживании при соблюдении необходимой температуры, не ниже 53° С, обеспечивается необходимая для почвенной утилизации степень обеззараживания осадков, а также полная дегельминтизация.

При мезофильном сбраживании обеззараживание существенно ниже, дегельминтизация не происходит.

При нарушениях эксплуатации, в отсутствие систем сбора и очистки газовых выбросов из сооружений, связанных с метантенками (загрузочно-выгрузочные камеры, уплотнители, резервуары) возможно загрязнение атмосферного воздуха, в том числе дурнопахнущими веществами. Сброс неутилизированного биогаза без сжигания на «свече» приводит к существенному распространению запахов и токсичных веществ и является недопустимым.

Метод трансформирует часть органического вещества твердой фазы осадка в газовую фазу в виде метана и углекислого газа. Меньшая часть органического вещества, а также выделяющиеся при разложении азот и фосфор переходят в жидкую фазу (в иловую воду). Газовая фаза утилизируется при сжигании. Таким образом, единственными массовыми продуктами трансформации твердой фазы являются углекислый газ и вода. Получение энергии из биогаза снижает нагрузку на окружающую среду в сфере энергетики<sup>141</sup>.

Переход органического вещества в жидкую фазу невелик и не превышает 2–4% от входящего потока вещества. Более существенно выделение в жидкую фазу азота (около 15% от входящей нагрузки на очистные сооружения) и фосфора (около 10–15%).

Принципиальные ограничения для использования данного метода для разного масштаба очистных сооружений отсутствуют (в животноводстве успешно эксплуатируются анаэробные реакторы объемом в сотни кубических метров). В то же время целесообразность применения следует рассматривать, начиная с больших очистных сооружений<sup>142</sup>. Отсутствие в технологии стадии осветления не отменяет целесообразности применения сбраживания, но увеличивает масштаб сооружений, при котором оно целесообразно, либо (как в зарубежной практике) предполагает использование методов предобработки сточных вод, увеличивающий степень распада органического вещества активного ила.

Данный метод требует существенной площади на территории очистных сооружений (но не более 10% от площади сооружений очистки сточных вод). Одним из ключевых факторов, влияющих на возможность реализации данного метода на очистных сооружениях, является необходимость строительства значительных емкостей метантенков, создания газово-энергетического хозяйства (сооружения и оборудование по сбору, накоплению, очистке и утилизации биогаза). Метантенки сооружаются как наземные емкости, поэтому (в отличие от подземных емкостей) любая неплотность в бетоне либо в металлоконструкции приводит к утечке наружу.

<sup>141</sup> ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов.

<sup>142</sup> Категорирование очистных сооружений в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 г. № 1430 «Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов».

Кроме того, требуется предварительная обработка осадка: желательное максимальное (но не более 8–10% по сухому веществу) сгущение осадков, процеживание осадка первичных отстойников, а также, по современным требованиям, необходимо сгущение избыточного активного ила. Для повышения энергоэффективности анаэробной обработки осадка сточных вод желательное использование теплообменников для рекуперации тепла сброженного осадка, что позволяет снизить до трех раз энергозатраты для термофильного процесса и до двух раз — для мезофильного.

Сами метантенки и все элементы газового хозяйства потенциально взрывоопасны и требуют квалифицированной эксплуатации. Российские нормы, направленные на безопасную эксплуатацию метантенков, значительно усложняют (по сравнению с зарубежной практикой) все стадии применения метода, начиная с проектирования. Эти нормы предписывают значительные разрывы (20 м) между группой метантенков и газгольдерами, другими сооружениями либо проездами.

Периодически (даже при использовании эффективного перемешивания) необходима очистка метантенков от накапливающегося в них песка и корки. Даже с применением гидромеханизации это требует тяжелого ручного труда.

Использование более интенсивного термофильного сбраживания при времени обработки менее 10 сут возможно, но приводит к получению осадка с неудовлетворительными водоотдающими свойствами. Распространенным решением этой проблемы является промывка сброженного осадка очищенной водой (т. е. смешение с этой водой с последующим разделением смеси в уплотнителях). Это требует дополнительных капитальных вложений, площади, а также может являться источником загрязнения атмосферы.

Существенное (особенно при термофильном сбраживании) выделение в иловую воду аммонийного азота и фосфора увеличивает нагрузку по ним на основные сооружения. Хотя разработаны, но в России пока не применяются, эффективные и энергосберегающие методы локальной очистки от азота и фосфора. Применительно к фосфору существует технология, достигающая реутилизации этого ценного элемента в качестве удобрения.

Продолжительное время полученный на очистных сооружениях биогаз сжигался в котлах-утилизаторах для выработки тепловой энергии, используемой для поддержания температуры метантенков и других нужд (например, для отопления зданий, размещенных на очистных сооружениях). В настоящее время при строительстве сооружений для сбраживания осадка предусматривается использование биогаза для выработки электроэнергии. Для этого, как правило, применяются когенерационные установки на базе газотурбинных и поршневых двигателей внутреннего сгорания. Когенерация, как известно, является процессом совместной выработки электрической и тепловой энергии, при котором тепловая энергия получается как сопутствующий продукт из системы охлаждения двигателей. При этом электрический КПД когенерационных установок составляет 30–40%.

Газ, поступающий из метантенков, содержит серу в виде сероводорода, и его сжигание без предварительной очистки приводит к интенсивной коррозии оборудования. В связи с этим очистка биогаза от соединений серы вместе с его обезвоживанием является необходимой мерой по предотвращению коррозии. Очистка биогаза от соединений серы может проводиться с использованием физико-химических или биологических методов или их комбинации.

Разложение легкоразлагаемых органических веществ в аэробных или анаэробных условиях, снижение запаха при последующей обработке или использовании, получение биогаза — это важные составляющие стабилизации осадка сточных вод. Методы стабилизации осадков сточных вод, их выбор для конкретных очистных сооружений, показатели и условия их эксплуатации, а также подбор оборудования подробно описаны в ИТС 10-2019. Перечень основного оборудования для стабилизации осадков приведен в таблице 27.

Таблица 27. Основное оборудование для стабилизации осадков

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики
Аэробные стабилизаторы	Открытые емкости, конструктивно подобные азротенкам. Часть органического вещества смеси осадков (или только избыточного активного ила) окисляется в результате аэробного биохимического процесса, осуществляемого бактериями активного ила	Распад органического вещества осадка не превышает 20–25 %. Высокое энергопотребление (около 1/2 потребности на полную биологическую очистку)
Метантенки	Закрытые емкости без доступа воздуха, с мешалками (предпочтительно) и насосами. Содержимое метантенков нагревают острым паром (реже — в теплообменниках) до 53°С (термофильный процесс) либо до 35°С (мезофильный процесс). Часть органического вещества смеси осадков разлагается до смеси метана и углекислого газа (биогаз) в результате анаэробного биохимического процесса (сбраживания), осуществляемого, в том числе, метаногенными бактериями	Распад органического вещества до 45–48 %. Выход биогаза около 900 м <sup>3</sup> на 1 т распавшегося органического вещества осадка. Содержание метана — около 65 %. Очень низкие затраты электроэнергии. Затраты тепловой энергии на подогрев осадка до 160 кДж/1000 м <sup>3</sup> обрабатываемого осадка (термофильный процесс без рекуперации). Могут быть сокращены до 15–20 % от данного значения за счет рекуперации тепла, а также мезофильного процесса. Может использоваться вторичное тепло от подпроцессов сушки, сжигания, когенерации (при утилизации биогаза)

*Примечание.* Обработка осадков — это не единственный способ их стабилизации. Этот же эффект достигается использованием процессов компостирования и сушки. Подпроцесс сжигания полностью устраняет органическое вещество осадка.

### *Обеззараживание осадков сточных вод*

Не менее важным процессом обработки осадков сточных вод является процесс обеззараживания. Осадки сточных вод образуются в городском хозяйстве после очистки коммунально-бытовых и промышленных стоков. Отличительная экологическая особенность осадков городских сточных вод — высокая влажность (до 82%) и, как следствие, наличие быстроразвивающейся патогенной микрофлоры, яиц гельминтов. Это определяет способы обезвреживания и переработки осадков.

В соответствии с СанПиН 2.1.7.573-96 «Почва. Очистка населенных мест. Бытовые и промышленные отходы. Санитарная охрана почвы. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения» (в редакции 2011 г.) и СНиП 2.04.03-85 «Канализация. Наружные сети и сооружения» (редакция от 20.05.1986 г.) обезвреживание, обеззараживание и утилизация осадков сточных вод осуществляются следующими методами:

- термофильное сбраживание в метантенках или термическая обработка (сушка);
- дегельминтизация ИК-облучением;
- пастеризация при температуре 70°С в течение 20 мин;
- химическое обезвреживание;
- аэробная стабилизация с предварительным нагревом смеси сырого осадка с активным илом при температуре 60–65°С в течение 2 ч;
- компостирование с водопоглощающими и разрыхляющими компонентами — опилками, сухими листьями, соломой и торфом, при условии достижения во всех частях компоста температуры не менее 60°С;
- выдерживание на иловых площадках в течение 1–3 лет в зависимости от климатических условий.

Методы биологической (аэробной и анаэробной) и термической обработки были рассмотрены ранее, поэтому остановимся на химических методах обезвреживания.

Реагентная обработка осадков сточных вод (рис. 59) проводится не столько для разрушения органической части субстрата, сколько с целью обеззараживания, стабилизации и уплотнения осадка и не требует больших капиталовложений. Основным и наиболее дешевым реагентом является негашеная известь СаО. Обработка известью проводится исходя из соотношения 10–30% к общему объему субстрата в зависимости от метода обработки, состава осадка и продолжительности процесса. При обработке известью одновременно увеличивается щелочность среды ( $\text{pH} > 8$ ), останавливается процесс кислого брожения, являющийся источником неприятного запаха, гибнут практически все патогенные микроорганизмы, в том числе сальмонеллы. Кроме того, образование нерастворимых форм соединений при обработке известью способствует коагуляции<sup>143</sup> и уплотнению осадка (кондиционированию), что ускоряет осажение и улучшает фильтруемость. В сочетании с известью может применяться трехвалентное хлорное железо, что также способствует образованию хлопьев

<sup>143</sup> Коагуляция — процесс агрегации тонкодисперсных и коллоидных частиц.



с высокоразвитой поверхностью и более эффективному осаждению осадка за счет соосаждения. При этом происходит изменение форм связи молекул воды, что способствует изменению структуры осадка и улучшению его водоотдающих свойств. В качестве коагулянтов используют также сульфаты железа и алюминия. Для кратковременного обеззараживания жидких осадков можно применять сильные окислители — перекислые соединения и хлор.



Рис. 59. Установка дозирования жидких реагентов

Использование синтетических органических препаратов тиазона или дазомета в соотношении 0,2–2,0% к общей массе при выдержке не менее 3 сут также позволяет эффективно обезвреживать осадки сточных вод. При температуре 20–25°С тиазон разрушается и выветривается за 15–18 сут, но при пониженной температуре и влажности этот срок увеличивается до 25 сут и более. Поэтому после обработки тиазоном, обладающим неизбирательной фунгицидной (против плесеней, грибов), инсектицидной и другой активностью, осадки должны выдерживаться до 30 сут в буртах, покрытых пленкой, на площадках с твердым покрытием. Обработанный реагентами осадок можно вносить в почву осенью, после уборки урожая.

Результаты обезвреживания необходимо контролировать в лабораторных условиях при проведении агрохимических исследований на присутствие в осадках жизнеспособных яиц гельминтов (аскарид, власоглавы, анкилостомид и др.), патогенных энтеробактерий, а также на содержание подвижных форм фосфора, калия и тяжелых металлов (свинца, кадмия, хрома, меди, никеля, ртути, цинка).

После обеззараживания или сбраживания в метантенках осадки сточных вод могут быть использованы в качестве органических или органоминеральных

удобрений (при соблюдении режимов выдержки от месяца до полугода) под полевые и кормовые культуры, на пастбищах, полях под паром, для рекультивации земель, в городском зеленом хозяйстве.

Основное оборудование и реагенты для обеззараживания осадков приведены в таблице 28.

Таблица 28. Основное оборудование для обеззараживания осадков

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики
<i>Реагентное обеззараживание</i>		
Система дозирования реагента и перемешивания	Для дозирования негашеной извести в обезвоженный осадок применяют дозаторы сыпучих материалов, для перемешивания – двухвалковые смесители, для последующей транспортировки полученной смеси в бункер – скребковые транспортеры, специальные насосы (бетононасосы) или иное оборудование. Для дозирования жидких реагентов в жидкий осадок применяют расходно-растворную емкость реагента и дозирующий насос	При использовании негашеной извести обеззараживание достигается в результате действия высоких температур и pH. На ряде объектов применяют реагент с недоказанной эффективностью «ингибитора-стимулятора», призванного обеспечить дезинвазию осадка
<i>Термическое обеззараживание</i>		
Установка теплового обеззараживания	Применяются емкости для выдерживания жидкого осадка при температуре 65–70° С не менее 30 мин, с системой теплообменников нагрева и рекуперации (при подогреве горячей водой) или только рекуперации (при нагреве подачи пара) либо установки для обеззараживания обезвоженных осадков паром или инфракрасным облучением	Обеспечивает полное обеззараживание осадка

### **Уплотнение стабилизированных осадков**

В ходе стабилизации жидких осадков происходит распад существенной части органического вещества, что приводит к снижению содержания сухого вещества в осадке. Для оптимизации последующего обезвоживания осадков сточных вод проводят уплотнение. Используемое для этих целей оборудование в принципе может быть идентично применяемому для концентрирования жидких осадков (уплотнение и сгущение).

### **Обезвоживание осадка**

Обезвоживанием осадка сточных вод является удаление свободной влаги до остаточной влажности 70–85 % путем подсушки в естественных условиях на иловых площадках или механического обезвоживания на аппаратах механического обезвоживания с целью сокращения объема и массы образующегося осадка.

Для обезвоживания осадков используют два основных физических принципа:  
 — фильтрация жидкой фазы через фильтрующий элемент под давлением;  
 — отделение жидкой фазы под действием центробежных сил, в тысячи раз превышающих гравитационное поле.

Технологии обезвоживания в большой степени отождествляются с используемым обезвоживающим оборудованием.

По принципу фильтрации работают следующие методы (оборудование) обезвоживания:

— ленточные фильтр-прессы (рис. 60), в которых давление на осадок формируется протягиванием сдвоенной фильтровальной ленты, внутри которой находится осадок, через последовательность специальных валков;



Рис. 60. Ленточные фильтр-прессы

— камерные фильтр-прессы (рис. 61), в которых давление формируется высоконапорным насосом, закачивающим жидкий осадок в совокупность камер, внутри которых имеются фильтрующие элементы;

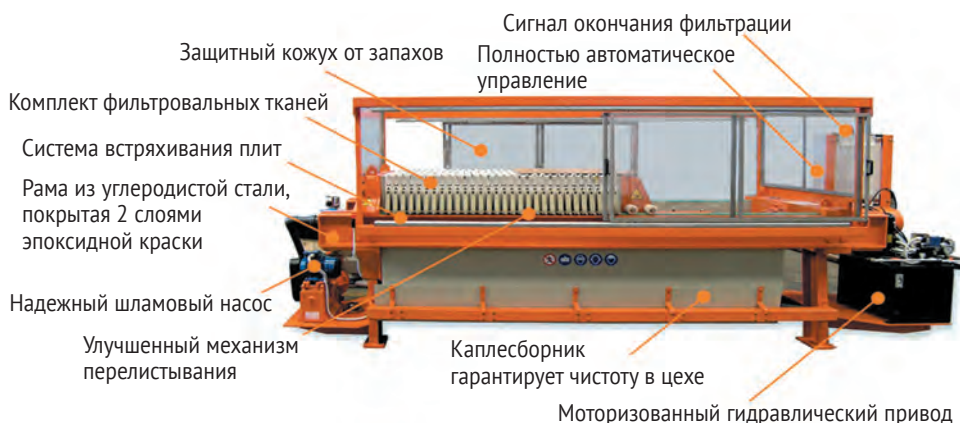


Рис. 61. Камерные фильтр-прессы (схема)

- шнековые прессы (рис. 62) (дегидраторы, обезвоживатели), в которых давление формируется шнеком, а в роли фильтрующего элемента выступает цилиндрическая сетка (стационарная либо подвижная наборная);

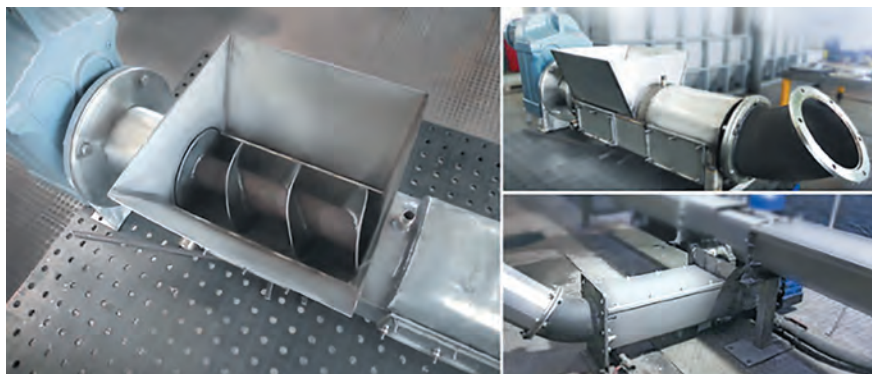


Рис. 62. Шнековые прессы

- одноразовые фильтрующие мешки и фильтрующие тубы (геотубы), в которых осадок обезвоживается под собственным весом; последние обладают существенными особенностями, однако опыт применения их для вновь образующихся осадков пока незначителен.

Центробежное поле используется в одном типе аппаратов — в центрифугах (центробежных декантерах).

Важным аспектом механического обезвоживания является кондиционирование осадка для придания ему оптимальных водоотдающих свойств. Для кондиционирования практически повсеместно используют органические полимерные флокулянты. На ОС Южного Бутова (Москва) применяют неорганические минеральные реагенты — хлорное железо и известь, однако использование минеральных реагентов — устаревший метод, который практически повсеместно заменен практически безальтернативным методом кондиционирования органическим флокулянтом.

Флокуляция разделяет единую среду на поток твердого осадка (вернее, пластичного) и поток жидкости, а это существенно уменьшает влажность осадка, приводит к многократному сокращению его объема, размещаемого в окружающей среде, при этом с водой удаляется в качестве возвратных потоков около 80–90% всех растворенных соединений. Хорошо обезвоженный осадок имеет консистенцию влажной почвы и может транспортироваться автотранспортом к месту утилизации. Использование органических флокулянтов практически не увеличивает количества сухого вещества осадка.

Устаревший метод обезвоживания с минеральными реагентами привносил в окружающую среду дополнительные вещества — гидроксиды железа и известь.

Технически метод реагентного обезвоживания (одна из разновидностей) применим для любых сооружений. Для небольшого количества образующегося осадка применимы мешочные фильтры, для небольших расходов (до 200 м<sup>3</sup> осадка в сутки) — шнековые обезвоживатели и декантерные центрифуги. При средних

и больших расходах осадка (до 5000 м<sup>3</sup> осадка в сутки) применимы центрифуги (рис. 63), ленточные и камерные фильтр-прессы. При сверхбольших расходах в настоящее время, как правило, используют центрифуги, единичная производительность которых может превышать 4000 м<sup>3</sup>/сут. Этот метод обезвоживания осадка достаточно компактен, но требует сложного оборудования и системы автоматизации процесса. Наиболее компактным оборудованием являются центрифуги, наибольшее пространство требуется для камерных фильтр-прессов.

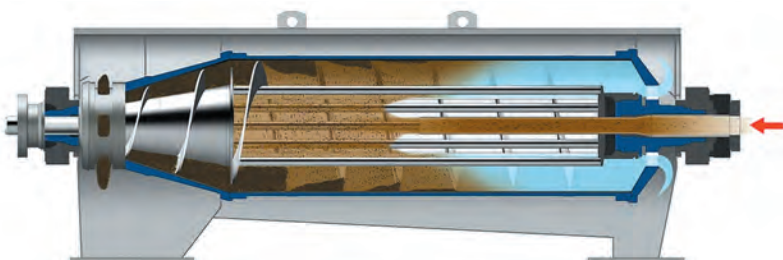


Рис. 63. Схема центрифуги

Таблица 29. Основное оборудование для обезвоживания осадка

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики
Аппараты механического обезвоживания	Жидкий осадок обрабатывают реагентами (в подавляющем числе случаев – органическими флокулянтами). В результате нарушения коллоидной структуры частиц осадка выделяется свободная вода. Она отделяется под давлением (в ленточных или камерных фильтр-прессах, либо шнековых прессах) или в центробежном поле (в центрифугах). Образующийся фильтрат (фугат) отводится. Процесс обезвоживания может быть периодическим (камерные фильтр-прессы) или непрерывным (все остальные типы оборудования)	Потребление флокулянта определяется его свойствами и типом обезвоживающего оборудования и изменяется в диапазоне 3–9 кг/т сухого вещества. Содержание сухого вещества в обезвоженном осадке зависит от типа и свойств осадка, а также типа оборудования. Практический диапазон составляет 18–30 %
Иловые площадки	Жидкий осадок наливают в неглубокие емкости (как правило, бетонные либо земляные) – иловые площадки, оборудованные системой для отвода сливной воды. После расслоения осадка отделившуюся сливную воду удаляют на ОС ГСВ на очистку. После отвода воды осадок подсыхает (либо вымораживается) под действием климатических факторов. Ворошение, а затем буртование ускоряют этот процесс	Содержание сухого вещества в обезвоженном осадке зависит в основном от соблюдения регламентных процедур и нагрузки на площадки. Практический диапазон составляет 25–40 %
Иловые площадки (с использованием флокулянта)	Для ускорения расслоения на площадке осадок перед наливом обрабатывают катионным флокулянтом. Это многократно ускоряет отделение сливной воды и последующее подсушивание осадка	Содержание сухого вещества в обезвоженном осадке 30–40 %

С точки зрения безопасности труда все производственные установки механического обезвоживания имеют свои потенциально опасные факторы:

- ленточные фильтр-прессы — движущиеся полуоткрытые детали;
- камерные фильтр-прессы — движущиеся открытые детали (плиты), высокое давление во время цикла фильтрации;
- центрифуги — высокие обороты.

Единственным типом оборудования, требующим применения физического труда персонала, являются камерные фильтр-прессы. Каждая из разновидностей технологии используется на десятках объектов в России. Основное оборудование для обезвоживания осадка приведено в таблице 29.

### *Обезвоживание осадков на иловых площадках*

Широко используемый в советский период метод обезвоживания осадка на иловых площадках (рис. 64) и в настоящее время не потерял актуальности. Осадок наливается в заданном количестве по отдельным площадкам (картам), где последовательно происходят отделение части иловой воды (с ее сливом), подсушка в результате испарения влаги, промораживание и оттаивание с дополнительным отделением воды.



Рис. 64. Иловые площадки канализационных очистных сооружений

Для интенсификации подсушки осадок, как правило, подвергают ворошению и буртованию. При надлежащем проведении процесса метод обеспечивает достаточно эффективное сокращение объема и массы осадка, размещаемого в окружающей среде, при этом удаляется в качестве возвратных потоков около 50% всех растворенных соединений, что существенно меньше, чем при механическом обезвоживании.

С увеличением количества открытых поверхностей осадка на иловых площадках усиливается выделение из него дурнопахнущих и загрязняющих воздух веществ (за счет улетучивания). Особенно это проявляется при направлении на иловые площадки нестабилизированных осадков, которые перегнивают в ходе подсушки. Применение иловых площадок неизбежно приводит к загрязнению грунтовых вод и атмосферного воздуха.

Технически метод применим для сооружений практически любой производительности. Однако в современных условиях он должен ограничиваться небольшими существующими очистными сооружениями (до 4 тыс. м<sup>3</sup>/сут) при условии, что его использование не создает экологических и санитарно-гигиенических проблем. Для сооружений более высокой производительности метод должен применяться лишь в качестве резервного по отношению к механическому обезвоживанию.

При обезвоживании осадка на иловых картах требуются большие площади, многократно превышающие промплощадку очистных сооружений, на которых образуется подсушиваемый осадок. При перегрузке по объему наливаемого осадка либо при использовании во влажном прохладном климате (северо-западные регионы) метод почти полностью теряет эффективность. В сухое жаркое время года глубоко подсушенный осадок может загораться подобно торфу.

#### *Обезвоживание осадков на иловых площадках с использованием флокулянта*

Данный метод аналогичен обезвоживанию осадка на иловых площадках за исключением следующих отличий, выделяющих его в отдельную технологию. Перед наливом осадка на площадки в него добавляется флокулянт (оптимально — специально разработанный для этой цели). В результате флокуляции твердой и коллоидной фаз происходит интенсивное отделение иловой воды. Ее отведение осуществляется через щелевые колодцы.

Благодаря рыхлой пористой структуре сфлуктурированного осадка поверхность испарения существенно возрастает, что ускоряет дальнейшую сушку. Высокая пористость приводит к проникновению кислорода воздуха вглубь слоя подсыхающего осадка, что, благодаря химическим и биохимическим процессам окисления, ведет к существенному снижению эмиссии в атмосферу восстановленных соединений, отвечающих за неприятные запахи. Структуры сфлуктурированного осадка достаточно устойчивы при выпадении атмосферных осадков. Нагрузка на иловые площадки может быть увеличена на 500% и более по сравнению с традиционной технологией использования иловых площадок.

### *Подготовка полезной продукции с использованием осадка сточных вод*

Подготовка осадков к дальнейшему использованию в качестве органических удобрений, почвогрунтов, рекультиванта и другой продукции выполняется путем дополнительной выдержки в естественных условиях осадков, подсушенных на иловых площадках или механически обезвоженных.

В процессе выдержки в течение нескольких лет достигается дополнительное подсушивание, вымораживание, стабилизация и минерализация органических веществ, а также обеззараживание за счет развития естественных микробиологических процессов. Выдержка осадков целесообразна, если в технологической схеме до обезвоживания не используется термофильное сбраживание либо после обезвоживания не применяется компостирование.

Сооружения для дополнительной выдержки обезвоженных осадков в естественных условиях применяются для осадков, подсушенных на иловых площадках до влажности порядка 80%. После подсушивания осадки продолжают находиться на иловых площадках до этапа механического обезвоживания, после чего они транспортируются и выгружаются на иловые площадки или специальные площадки для дальнейшей обработки. С целью интенсификации процесса дообработки (снижение влажности, минерализация, обеззараживание) проводят ворошение и дальнейшее буртование осадков. Выдержка может осуществляться от 2–3 до 5 лет и более, при этом чем длительнее выдержка, тем выше степень минерализации и заметнее снижение массы осадка.

В процессе выдержки влажность снижается до 40–65% и менее, зольность увеличивается до 40–55%. Осадок превращается в рассыпчатую массу с землистым запахом. Выдержанный осадок в зависимости от достигнутых свойств может быть использован в качестве органических удобрений, почвогрунтов и рекультивантов для технической рекультивации нарушенных земель.

Подготовка осадков к дальнейшему использованию в качестве органического удобрения проводится компостированием. При компостировании достигается стабилизация и гумификация органических веществ и обеспечивается товарный вид.

Компостирование является аэробным биотермическим процессом разложения органического вещества, в результате которого происходит обеззараживание, снижение влажности (не менее чем до 50%) и массы осадка, улучшение физико-механических свойств компостируемой массы. При компостировании часть твердого вещества разлагается с образованием углекислого газа (выделяется при окислении кислородом воздуха в компостируемой массе). Основными факторами, определяющими эффективность процесса, являются качество исходного материала, температура, воздушный режим и реакция среды.



Процесс компостирования проходит в две стадии<sup>144</sup>:

- термофильная стадия осуществляется термофильными микроорганизмами и характеризуется повышением температуры компостируемой массы до 50–60° С. При этом достигается ее обеззараживание и минерализация, т. е. микробное разложение органического вещества и повышение зольности. За счет высокой температуры происходит значительное высушивание компостируемой массы. В зависимости от времени закладки компоста и в условиях достаточного доступа воздуха эта стадия протекает в течение 1–3 недель, после чего наблюдается постепенное снижение температуры с переходом ко второй стадии процесса;
- мезофильная стадия осуществляется мезофильными микроорганизмами при температуре 30–35° С. На этой стадии происходят дозревание компоста (продолжение стабилизации органического вещества), сушка и улучшение его физико-механических свойств, дальнейшее отмирание патогенных микроорганизмов. Продолжается высушивание компоста, что достигается достаточной аэрацией и (или) перемешиванием, обеспечивающими значительное удаление влаги и увеличение содержания сухого вещества.

Существуют различные варианты технологий приготовления компоста, в том числе: технология приготовления буртовым (площадочным) способом в различных вариантах; приготовление компостной массы с помощью смесителя и дальнейшее компостирование приготовленной смеси на площадке компостирования; проведение первой (термофильной) стадии в контейнерах различной конструкции и дальнейшее созревание на площадках и др.

Для быстрого начала разложения и оптимального протекания компостирования должны быть выполнены следующие требования к исходному сырью: влажность компостной массы — 70–75 %, отношение углерода к азоту — 25–40, рН — не менее 6,5, рыхлая укладка. Поскольку механически обезвоженные осадки, как правило, не соответствуют этим требованиям, то для снижения влажности, обогащения углеродом и повышения пористости осадки необходимо смешивать с наполнителем. В качестве наполнителей могут применяться древесные опилки, торф, растительные отходы и др. Количество используемого наполнителя определяется рядом факторов, в том числе исходной влажностью осадка и наполнителя и соотношением углерода, азота и фосфора в компостной массе. Наполнителем может служить готовый компост. При этом применяют как двухкомпонентные (осадок–наполнитель), так и трехкомпонентные (осадок–компост–наполнитель) смеси, что позволяет снизить количество используемого наполнителя и, следовательно, эксплуатационные затраты.

Аэрация компостируемой смеси в буртах осуществляется либо подачей воздуха через слой компостируемой массы (например, через щелеванное днище), либо путем периодического ворошения. При компостировании в реакторах аэрация производится либо также через днище, либо путем вращения барабана и пересыпания его содержимого.

<sup>144</sup> Миронов В. В. и др. Биотермокомпостирование органических отходов // Техника и технологии в животноводстве. — 2019. — № 4 (36). — С. 37–45.

Окончательное дозревание компоста можно проводить путем его дальнейшей выдержки (хранения) на открытых площадках при укрытии его влагоизолирующим материалом. При созревании компоста в результате снижения влажности до 50–55 % и органического вещества на 20–30 % происходит уменьшение массы компостируемого материала на 30–35 %.

Компостирование позволяет разложить (окислить) нестабильное органическое вещество осадка, которое в противном случае разлагается в окружающей среде с эмиссией неприятно пахнущих веществ и летучих загрязнений (например, при разложении в почве, захоронении либо ином складировании). При достаточной аэрации выделение загрязняющих и дурнопахнущих веществ невелико, а при недостатке кислорода развиваются гнилостные процессы и выделение дурнопахнущих веществ существенно возрастает.

Уменьшение количества сухого вещества осадка приводит к сокращению его объема, размещаемого в окружающей среде, однако эффективность разложения органического вещества не превышает 70 % от анаэробного сбраживания.

Компостируемый осадок обладает хорошими мелиорационными и удобрительными свойствами, внешним видом, сыпучестью, высокопроницаем для воздуха, имеет сформировавшуюся почвенную микрофлору. Метод обеспечивает требуемую для почвенной утилизации степень обеззараживания осадков. Хорошо стабилизированный компост может храниться неограниченно долго и имеет минимум запаха даже при увлажнении.

Компостирование — энергоемкий процесс. Он требует либо энергозатрат для подачи большого количества воздуха, либо расхода электроэнергии на вращение компостного барабана, либо расхода моторного топлива. Энергозатраты не могут быть рекуперированы.

Выделяющийся при распаде органического вещества аммонийный азот может попадать в воздух. Возвратные потоки жидкости практически отсутствуют (за исключением непитавшихся и подлежащих отведению атмосферных осадков — при компостировании вне здания).

Технически метод применим для сооружений любой производительности. Не следует рассматривать компостирование только как метод подготовки осадка к почвенной утилизации. Определенные модификации технологии в зарубежной практике используют для получения из осадка низкокалорийного топлива (так называемый процесс биосушки).

Промышленное проведение процесса имеет ограничения по минимуму производительности (ориентировочно — около 50–100 м<sup>3</sup> в сутки по исходному осадку), так как для оптимального проведения процесса в промышленных масштабах необходимо использование комплекта специальной техники: измельчителей, смесителей, буртоукладчиков, виброгрохотов и т. п. Данное оборудование является специализированным и дорогостоящим. Его целесообразно использовать при достаточной загрузке.

Метод требует максимальной площади из всех технологий стабилизации осадка (кроме длительной стабилизации за счет вылеживания на площадках хранения). Однако площадки компостирования могут быть размещены вне основной промплощадки очистных сооружений, в том числе вблизи мест

образования материалов-наполнителей или мест утилизации. Сооружения безопасны и просты в эксплуатации.

В условиях России площадочное компостирование требует значительного времени. При компостировании на открытых площадках на процесс влияют как атмосферные осадки, так и температура, при использовании навесов — только температура. В средней полосе России зимой процесс на открытых площадках замедляется не менее чем в два раза. В Северо-Западном регионе при закладке в весенне-летний период компост созревает в течение 3–4 месяцев, при осенне-зимней закладке — в течение 5–6 месяцев. Сокращение сроков компостирования до двух месяцев может быть достигнуто за счет использования биопрепаратов<sup>145</sup>.

При аэрации воздухом на площадках метод увеличивает затраты на электроэнергию на очистных сооружениях до 30%. Однако есть способы снижения энергозатрат за счет более полного использования кислорода воздуха путем последовательного его пропускания через несколько зон компостирования (при туннельном компостировании). При ворошении с помощью техники требуется расход моторного топлива, но это также более рациональный способ.

При размещении осадка на полигонах захоронения отходов компостирование нецелесообразно.

Получаемые технологические характеристики вторичной продукции соответствуют заданной рецептуре почвогрунта.

#### *Термическая сушка осадка*

Снижение влажности осадка до 8–35%, сокращение массы по сравнению с обезвоженным осадком примерно в четыре раза, стабилизация осадка, обеззараживание, обеспечение его сыпучести обеспечиваются методом термической сушки. Метод применяется для подготовки осадка к дальнейшему использованию в качестве органического удобрения, биотоплива или проведению дальнейшего процесса конверсии органического вещества в газообразное топливо (пиролиз и др.)<sup>146</sup>. Ранее обезвоженный осадок нагревают до температуры, способствующей ускоренному испарению влаги.

По физическому принципу метод разделяют:

- на прямую сушку, при которой нагрев осадка проводят дымовыми газами от сжигания топлива;
- на непрямую (контактную) сушку, при которой нагрев осадка проводят через поверхность теплообмена.

Одной из главных решаемых задач при использовании данного метода является обеспечение максимального теплообмена. В системах прямой сушки это решается, в частности, одним из следующих технических приемов:

- поды, по которым распределяется и движется осадок;
- сетки, на которые распределяется осадок и затем движется вместе с ними;

<sup>145</sup> Теплых С. Ю., Тополова В. В. Технология компостирования осадка иловых полей очистных сооружений // Градостроительство и архитектура. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 143–153.

<sup>146</sup> Обработка осадков городских сточных вод / Э. П. Доскина и др.

- использование псевдооживленного слоя;
- вращающиеся коаксиальные барабаны.

В системах непрямой сушки для интенсификации теплообмена, в частности, используют:

- вращающиеся в слое осадка теплопередающие конструкции;
- нагревающий трубный змеевик в псевдооживленном слое осадка.

Перечисленные приемы не являются исчерпывающими.

Высушенный осадок может гранулироваться в виде пеллет для оптимизации его последующего применения.

Преимуществом данного метода является значительное (после обезвоживания) уменьшение количества осадка: сокращение его массы до трех раз и объема — до четырех раз. Высушенный осадок имеет сыпучую консистенцию и может транспортироваться автотранспортом к месту утилизации. Высушенный при температуре свыше  $100^{\circ}\text{C}$  осадок обеззаражен и дегельминтизирован.

Сушка осадка приводит к испарению из него большинства летучих органических и неорганических веществ, а также (в зависимости от используемой температуры процесса) к частичному низкотемпературному пиролизу органического вещества с выделением в выпар летучих органических соединений.

Как правило, технология термической сушки предусматривает:

- конденсацию выпара, при этом в него переходят многие летучие вещества, такие как аммонийный азот, летучие жирные кислоты; выпар, как правило, направляется на очистку в голову сооружений;
- после конденсации выпара — осуществление необходимой очистки отходящих газов.

Однако некоторое выделение дурнопахнущих и загрязняющих воздух веществ от сооружений сушки все же происходит.

Термическая сушка — достаточно энергоемкий процесс. На испарение влаги расходуется около  $2250\text{ кДж/кг}$  (эквивалентно примерно  $75\text{ м}^3$  природного газа на  $1\text{ т}$  испаренной влаги). Источник этой энергии и возможность ее рекуперации существенно варьируют в зависимости от применяемых технологий обработки осадка. Рекуперация значительной части тепла, пошедшего на сушку, возможна путем конденсации выпара (при этом можно перевести в нагрев воды значительную часть разницы между высшей и низшей теплотой парообразования), а также с использованием тепловых насосов.

Наиболее высокая энергетическая эффективность — у технологической схемы, включающей в себя мезофильное сбраживание, когенерацию на биогазе, сушку отходящими газами газовых двигателей, обогрев метантенков конденсатом выпара осадка.

Установки для термической обработки осадка сточных вод (рис. 65) достаточно компактны, но являются сложным оборудованием, они должны быть обеспечены системой автоматизации процесса и квалифицированным персоналом.

Препятствием для использования данного метода может стать отсутствие альтернативного источника энергии и тепла (биогаз, выхлопные газы от сжигания биогаза в газовых двигателях, тепло от процесса сжигания осадка) и потребителя низкопотенциального рекуперированного тепла, которые существенно

влияют на себестоимость процесса. Сушка осадка товарным топливом без рекуперации тепла — слишком дорогой процесс.



Рис. 65. Термическая сушка осадков сточных вод

Кроме этого, метод характеризуется рядом потенциальных опасностей:

- пылевоздушная смесь (высушенного осадка и воздуха) взрывоопасна; для предотвращения возникновения таких условий в системах сушки контролируют содержание кислорода в газовой смеси внутри аппаратов — не выше определенного значения, а также не допускают выделения пыли наружу;
- высушенный осадок способен самовозгораться в местах его хранения; с этой целью не допускают хранения больших его количеств;
- использование высокопотенциальных источников теплоты (топливо, отходящие газы от сжигания).

Перечень основного оборудования для термической сушки приведен в таблице 30.

#### *Сжигание осадка (термическая утилизация)*

Одним из радикальных методов обработки осадка сточных вод с целью максимального сокращения его объема путем окисления всей органической части осадка с получением тепловой энергии является сжигание осадка. В России в настоящее время используют установки сжигания в псевдоожиженном слое песка. Известен еще целый ряд вариантов реализации процесса сжигания и применяемого оборудования, но для осадка городских сточных вод они пока не нашли применения в отечественной практике.

Таблица 30. Перечень основного оборудования для термической сушки

Оборудование	Краткое описание	Технологические характеристики		
		Наименование	Ед. изм.	Значение
Установки конвективного типа (прямая сушка)	Сушку осуществляют за счет непосредственной подачи дымовых газов от сжигания топлива в сушильный аппарат. Отходящие газы подвергают дожигу или тщательной очистке	Остаточная влажность	%	8–35*
		Удельное энергопотребление	кДж/кг выпаренной воды	3300–3800
Установки кондуктивного типа (непрямая сушка)	Сушку осуществляют за счет передачи тепла от нагретого теплоносителя (термомасло, перегретая вода) через стенки к осадку. Теплоноситель нагревают посредством сжигания топлива. Для хорошей теплопередачи сушильный барабан вращается	Остаточная влажность	%	8–35
		Удельное энергопотребление	кДж/кг выпаренной воды	3550–4000**

\* Верхнее значение – для применения частичной термосушки.

\*\* Непрямая сушка в некоторых вариантах технологий позволяет осуществлять рекуперацию энергии испаренной влаги; в этих случаях энергопотребление снижается до 2300 кДж/кг выпаренной воды.

Осадок сжигается в горячем слое песка, который псевдоожигается поступающим в зону горения воздухом. В процессе псевдоожигания он эффективно смешивается с песком, вода быстро испаряется, а органическое вещество окисляется. В верхней части печи, свободной от кипящего слоя, происходит доокисление в газовой фазе. Полученная в результате сжигания зола улавливается на электрофильтрах, а дымовые газы очищаются мокрой (щелочным реагентом) или сухой (рукавные фильтры) газоочисткой.

Если процесс сжигания не требует подачи в печь дополнительного топлива, его называют автотермичным.

Известно несколько конструкций печей, из которых в России для сжигания осадка нашли применение только конструкции с псевдоожиганным слоем.

Требуемые для данного метода внешние энергоресурсы и их величина зависят от содержания сухого вещества и органики в исходном осадке.

Содержание органического вещества в золе является важной технологической характеристикой и не должно превышать 5%.

Данный метод обеспечивает практически полное уничтожение органического вещества осадка, что имеет положительное экологическое значение при невозможности почвенной утилизации осадка. Количество сухого вещества сокращается в 3–4 раза, объем (относительно обезвоженного осадка) — до 15 раз.

Зола после сжигания осадка городских сточных вод относится к отходам IV класса опасности (опыт установок в Санкт-Петербурге). В России на очистных сооружениях работают только три установки-завода по сжиганию осадка (ЗСО) в Санкт-Петербурге: Центральная (ЦСА) и Северная (ССА) станции аэрации и Юго-Западные очистные сооружения (ЮЗОС). За период эксплуатации ЗСО было утилизировано свыше 5 млн м<sup>3</sup> обезвоженного осадка.

На ЗСО в Санкт-Петербурге используются многоступенчатые системы газоочистки, исключающие попадание токсичных веществ в атмосферу. По результатам контроля, в том числе рядом независимых лабораторий, за время эксплуатации ЗСО превышений концентраций загрязняющих веществ в очищенных дымовых газах зафиксировано не было (российские нормативы более жесткие, чем европейские).

Для оценки степени биологической опасности на данных объектах применяется биоэлектронная система контроля качества газовых выбросов завода. В качестве тест-объектов используются легочные моллюски — африканские улитки. Данная система позволяет отслеживать не только потенциальные риски случайных залповых выбросов токсикантов (при аварийной ситуации), но и риски от длительного воздействия на живые организмы даже очень малых концентраций различных продуктов неполного сгорания ила (осадка). Информация от системы биомониторинга подтверждает данные химического контроля.

*Сжигание в печах с псевдооживленным слоем  
на примере ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»*

Печь (рис. 66) состоит из следующих частей: дутьевая камера, свод псевдооживления, реактор, газоход.

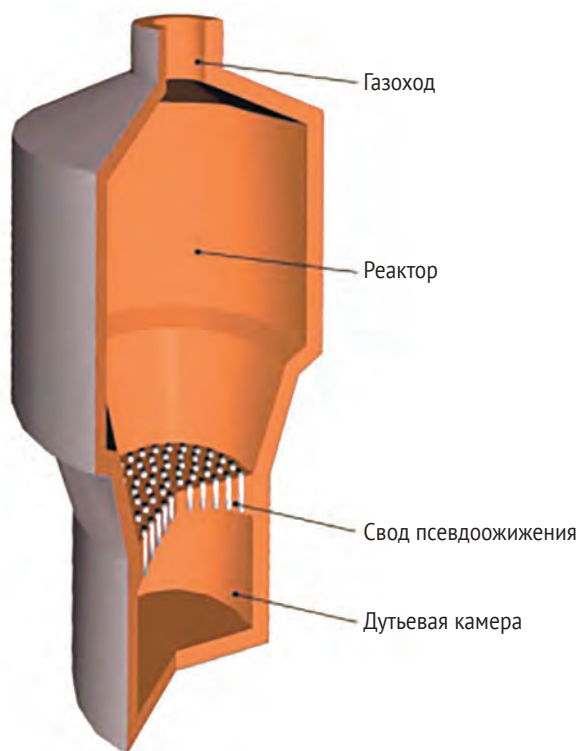


Рис. 66. Печь с псевдооживленным слоем (схема)





*Мокрая промывка газов* (рис. 67) включает в себя две ступени: кислую и щелочную. Первая ступень — кислая газоочистка осуществляется при снижении температуры газовых выбросов ( $50^{\circ}\text{C}$ ) ниже температуры точки росы. При этом происходит интенсивная конденсация влаги, содержащей в большом количестве соединения серы и фосфора. Кислая промывка газов проводится промывочной водой с  $\text{pH} = 4,5$ . При резком понижении температуры газов тяжелые металлы переходят в аэрозольное состояние и легко растворяются в промывочной воде. Вторая ступень — щелочная газоочистка производится орошением газовых выбросов раствором каустической соды  $\text{NaOH}$  в колонне щелочной промывки. При щелочной промывке дымовых газов улавливаются такие компоненты, как двуокись серы, хлористый водород, фтористый водород.

При сухой очистке дымовых газов удаление загрязнений осуществляется введением реагентов: бикарбоната натрия и активированного угля. После смешения с реагентами дымовые газы направляются на рукавные фильтры, где удаляются конечные продукты реакции. Очистка рукавов производится периодической обратной продувкой сжатым воздухом. Газоочистные системы на заводах сжигания осадков Санкт-Петербурга стабильно обеспечивают содержание загрязнений в атмосферном воздухе на границе санитарно-защитной зоны ниже ПДК, действующих в РФ.

В процессе газоочистки производится охлаждение дымовых газов. Снятое при этом тепло на котлах-утилизаторах используется для получения пара<sup>147</sup>.

### *Отнесение осадков сточных вод к продукции*

Осадки, обработанные тем или иным способом с целью подготовки к применению в качестве органических удобрений, компостов, почвогрунтов, рекультивантов и соответствующие документации, определяющей требования к осадкам, используемым в этих целях, или разработанным ТУ на конкретный вид продукции, являются побочной продукцией.

### *Отнесение осадков к отходам*

В соответствии с законом «Об отходах производства и потребления» (№ 458-ФЗ, статья 1, пункт а) «отходы производства и потребления (далее отходы) — вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с настоящим ФЗ».

Удалению с территории очистных сооружений, на которых осуществляются очистка воды и обработка осадков, подлежат осадки, прошедшие технологические стадии обработки, предусмотренные проектной и технической

<sup>147</sup> Рублевская О. Н. Обработка и утилизация осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга: опыт и перспективы // Водоснабжение и санитарная техника. — 2018. — № 10. — С. 47–51.

документацией, не предусматривающей получение из них вторичной продукции, отгружаемой потребителю, либо не получившие применения как удобрение, рекультивант или иное, в соответствии с упомянутыми документами. Таким образом, эти осадки относятся к отходам производства и потребления.

Осадок после промежуточных стадий обработки не подлежит удалению с территорий очистных сооружений, не классифицируется как «отход производства и потребления».

Осадки, не используемые в качестве побочной продукции или не соответствующие требованиям указанной нормативной документации, удаляемые за пределы технологических сооружений и размещаемые на полигонах ТБО, полигонах промышленных отходов и специализированных полигонах, относятся к отходам производства и потребления. Класс опасности устанавливается в соответствии с «Критериями отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды» и в основном относятся к IV–V классам опасности для окружающей среды.

На объем образования осадков (по сухому веществу), относящихся к отходам, влияют следующие объективные факторы:

- загрязненность сточных вод грубыми отбросами;
- эффективность задержания отбросов на решетках;
- загрязненность сточных вод песком;
- эффективность задержания песка в песколовках;
- загрязненность сточных вод (концентрация взвешенных веществ и БПК); чем выше загрязненность и глубже очистка, тем больше масса сухого вещества осадка;
- удельная нагрузка на сооружения биологической очистки по органическим веществам (чем ниже нагрузка, тем меньше образование избыточного активного ила);
- использование реагентов для осаждения фосфатов (увеличивают массу избыточного активного ила);
- наличие и эффективность работы сооружений по стабилизации осадка, которые снижают массу сухого вещества;
- глубина обезвоживания осадка, включая наличие и эффективность сооружений механического обезвоживания, использование минеральных реагентов для кондиционирования осадка (резко увеличивают массу по сухому веществу и фактическую массу), соблюдение регламента эксплуатации иловых площадок, наличие подпроцессов компостирования, сушки, сжигания.

Диапазон количества образующихся отходов при условии, что осадки не находят применения и размещаются или утилизируются как отходы в зависимости от технологий, существенно влияющих на это количество, подробно описан в ИТС 10-2019. Таким образом, количество образующихся осадков определяется разнонаправленными факторами, что не позволяет осуществлять технологическое нормирование этих эмиссий. Неприемлемость нормирования количества осадков как отходов имеет и более глубокие основания, нежели большой диапазон их возможных объемов.

Подходы к процессу очистки как к обработке сточных вод с целью, в том числе, минимального образования осадка как отхода, подлежащего удалению, являются устаревшими. Современный, энергоресурсный, подход к очистке (точнее — обработке) сточных вод ориентирует относиться к ней как к процессу концентрирования и утилизации составляющих ее химических веществ и элементов, имеющих энергетическую, удобрительную и иную ценность, а также тепловой энергии самих сточных вод. Этот подход основывается как на понимании конечности природных ресурсов (нефть, фосфаты), так и на устойчивом росте стоимости ресурсов, произошедшем в последние два десятилетия.

С позиций энергоресурсного подхода чем больше выделено из сточной воды ее составляющих (органическое вещество, азот, фосфор), тем больше веществ может быть утилизировано как на самих очистных сооружениях (для получения энергии), так и за их пределами. В силу того что процессы денитрификации и удаления фосфора нуждаются в органическом веществе для своего протекания, они конкурируют с энергогенерирующими процессами (прежде всего анаэробным сбраживанием) за органическое вещество. Технологический уровень современных решений, например в Европейском союзе, сейчас оценивается в основном по уровню эффективности получения энергии из сточных вод при неизменном (высоком) уровне очистки. Однако возможно и целесообразно осуществлять нормирование (для крупнейших объектов и выше) на основе технологических показателей критических свойств отходов, непосредственно влияющих на окружающую среду.

К этим свойствам следует отнести:

- содержание органического вещества в осадке (нормирование слишком высокого содержания органического вещества как критерия нестабильности осадка);
- содержание органического вещества в песке;
- содержание органического вещества в отбросах с решеток.

Образование отходов на объектах очистки поверхностных (дождевых) сточных вод полностью определяется их поступлением с дождевыми стоками, а оно, в свою очередь, условиями их формирования, находящимися вне сферы влияния организации, эксплуатирующей эти системы водоотведения. Трансформация поступающих с поверхностными водами загрязняющих веществ практически отсутствует, за исключением очистки на биоплато. Единственным процессом обработки отходов является обезвоживание осадков. Таким образом, количество отходов, образующихся в ходе обработки поверхностных сточных вод, по сухому веществу не подлежит нормированию. Необходимо нормировать содержание сухого вещества в фактической массе отходов.

### **Расширение возможности получения вторичной продукции из осадка городских сточных вод. Перспективные технологии**

Существует ряд перспективных технологий обработки осадка, направленных на получение высококачественной вторичной продукции. Применение таких технологий должно быть обусловлено высоким спросом на них, т. к. они являются энергоемкими, высокзатратными и высокотехнологичными.

### *Аэробная термофильная автотермичная стабилизация жидких осадков*

По биологическим основам данный процесс не отличается от обычной аэробной стабилизации, однако осуществляется другими группами аэробных гетеротрофных микроорганизмов — термофильными. В связи с этим по конструктивному оформлению и эффективности отличия процесса весьма существенны.

Обрабатываемый осадок подается в аэрируемые (как правило, с подачей сжатого воздуха в механические диспергаторы) закрытые реакторы, в которых происходит аэробный процесс биологического окисления органического вещества осадков. В процессе окисления концентрированных осадков (избыточный активный ил подлежит предварительному сгущению, оптимальная концентрация подаваемой смеси осадка — 45–60 г сухого вещества на 1 л) выделяющаяся теплота нагревает теплоизолированный реактор до температур термофильного процесса — свыше 50° С (аналогично процессу компостирования обезвоженных осадков). Такие условия позволяют не только в несколько раз ускорить проведение процесса по сравнению с обычной аэробной стабилизацией, но и до 1,5–1,8 раза увеличить глубину распада органического вещества осадка.

Благодаря результатам процесса и схожему конструктивному оформлению данный метод часто называют аэробным термофильным автотермичным сбраживанием (хотя процесс с биохимической точки зрения сбраживанием не является).

Технологическая эффективность обеспечивается распадом органического вещества до 50–60%. При этом метод обеспечивает любую требуемую для почвенной утилизации степень обеззараживания осадков.

Термофильная аэробная стабилизация — наиболее энергоемкий процесс, требующий наибольшего расхода электроэнергии. Это объясняется пониженной эффективностью растворения кислорода воздуха в воде (низкое значение так называемого альфа-фактора). Энергозатраты не могут быть рекуперированы.

Как правило, отходящий воздух из стабилизаторов требует очистки от загрязняющих веществ, а в холодное время — также и охлаждения с каплеулавливанием. Выделяющиеся при распаде азот и фосфор переходят в жидкую фазу (в иловую воду). Выделение в жидкую фазу азота не превышает 15% от входящей нагрузки на очистные сооружения, фосфора — 10–15%.

Технически метод применим для сооружений любой производительности. Метод достаточно компактен, однако требует использования специальных реакторов, систем аэрации и системы автоматизации процесса. Сооружения безопасны в эксплуатации.

Данный метод увеличивает затраты на электроэнергию на очистных сооружениях не менее чем на 30–50% (большее значение — для совместной стабилизации осадка первичных отстойников и ила), что может быть препятствием для его использования.

Обработанный методом аэробного термофильного сбраживания осадок обладает наилучшими водоотдающими свойствами, а также оптимален для использования (после обезвоживания) в качестве удобрения для любых целей и культур (при соблюдении требований к содержанию токсичных веществ).

### *Вермикомпостирование осадка*

Получение из осадков высококачественного удобрения может быть достигнуто с применением технологии вермикомпостирования. Обезвоженные осадки (лучше — предварительно подвергнутые аэробной стабилизации) добавляются в качестве питания к биомассе красных калифорнийских червей, культивируемых в процессе вермикомпостирования. Черви питаются веществом осадка, выделяя биоудобрение (копролиты). Процесс осуществляется в буртах, тонкослойных поддонах, биореакторах в полупериодическом режиме. По окончании процесса черви отделяются от обработанного осадка и используются в следующем цикле.

Технология вермикомпостирования требует ручного труда, ответственного контроля за процессом, значительных площадей зданий, где она реализуется и характеризуется высокой материалоемкостью (стеллажи, поддоны).

Преимущества данного метода заключаются в получении особо высококачественного удобрения, которое может быть реализовано с получением дохода, вовлечением органического вещества осадка в природные циклы биологической трансформации веществ и сокращением применения минеральных удобрений, что является благоприятным фактором для поддержания устойчивого состояния окружающей природной среды.

Метод может применяться на сооружениях небольшой производительности. Кроме того, масштабы использования данного метода определяются рынком сбыта вермикомпоста.

### *Пиролитическая газификация осадка*

Данная технология направлена на уменьшение объема осадка с получением из него горючего газа с последующей утилизацией его для выработки электроэнергии. Обезвоженный и высушенный осадок нагревается в замкнутом объеме, происходит процесс пиролиза, выделяется пиролитический газ (смесь летучих органических веществ), образуется кокс. На следующей стадии процесса происходит частичное сжигание кокса (с ограниченным доступом кислорода), в результате чего выделяется синтез-газ (смесь водорода и монооксида углерода). Смесь пиролитического газа и синтез-газа используется в качестве топлива. В результате процесса образуется зольно-угольный остаток.

Техническим и экономическим преимуществом по сравнению с устоявшимися технологиями является высокая степень конверсии органического вещества осадка в полезную энергию при минимальном объеме газовых выбросов. Кроме того, за счет многократно меньшего объема выбросов и иной аэродинамики реактора наблюдается значительно меньший выброс пылевидных частиц по сравнению со сжиганием. Применение данной технологии требует предварительной сушки осадка. Кроме того, синтез-газ токсичен и взрывоопасен, хотя и применялся в качестве топлива для газовых фонарей с начала XIX в. Процесс пиролиза твердых топлив достаточно хорошо известен. Теплотворная способность синтез-газа довольно невысока (значительно меньше, чем у биогаза)<sup>148</sup>.

<sup>148</sup> Туровский И. С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание. — М.: ДеЛи принт, 2008

### *Остеклование осадка*

Термическая переработка осадка с получением из минеральной части товарного экологически и санитарно безопасного материала, который может использоваться в строительстве и производстве, является основой технологии остеклования осадка сточных вод. Предварительно обезвоженный и глубоко высушенный осадок сжигается с подачей воздуха (предпочтительно обогащенного кислородом) в топке, позволяющей достигать температуры 1100–1200° С, при которой минеральная часть осадка расплавляется. Расплав отводится вниз топки и попадает в зону остывания, формируя стеклоподобные частицы заданных формы и свойств. Отходящие газы охлаждаются, в том числе в системах рекуперации и получения энергии, и после очистки сбрасываются в атмосферу. Таким образом, с применением данной технологии можно получить из минеральной части осадка вместо отхода (зола) товарный продукт. При этом происходит существенное сокращение массы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, исключение выброса органических соединений (диоксины, фураны) из-за повышенной температуры сжигания<sup>149</sup>.

Описанный метод требует предварительной сушки осадка, а также обогащения воздуха кислородом. Препятствия для его использования — необходимость специальных знаний для работы с минеральными расплавами, высокая стоимость оборудования, квалифицированный персонал.

### *Получение жидкого топлива из осадка*

Технология направлена на получение из осадка коммерческого нефтеподобного продукта. Это так называемый процесс «нефть из осадка». Обезвоженный высушенный осадок подвергается пиролизу. Благодаря специально подобранному давлению и использованию катализаторов происходит ожигение органического вещества с получением нефтеподобного продукта. Твердый остаток подлежит захоронению либо может быть сожжен.

Высокая эффективность преобразования органического вещества осадка в энергоноситель является неоспоримым преимуществом, при этом получаемое жидкое топливо может утилизироваться за пределами очистных сооружений; выбросы отходящих газов минимальны.

В то же время состав получаемого жидкого топлива должен удовлетворять требованиям по использованию в качестве моторного либо котельного топлива. Для реализации технологии необходимо сложное оборудование, производственный процесс является потенциально опасным, близким к нефтепереработке.

### *Суперкритическое жидкофазное окисление*

Технология направлена на значительное сокращение объема осадка, без использования сжигания, с целью минимизации воздействия на атмосферный воздух. Другие названия метода — гидротермальное окисление, «мокрое» сжигание. Глубоко сгущенный осадок нагревается в реакторе сверх так называемой

<sup>149</sup> Янцен О. В. и др. Выбор эффективной технологии утилизации осадков сточных вод // Природообустройство. — 2020. — № 5. — С. 117–123.

критической точки (374° С) и при соответствующем давлении подвергается химическому окислению кислородом, подаваемым компрессором. Оставшееся трудноокисляемое вещество может быть использовано как удобрение высшего класса (класс А по зарубежной терминологии).

Эффект сокращения объема обработанного осадка близок к достигаемому путем сжигания, однако вредные выбросы в атмосферу практически отсутствуют.

Препятствием для применения метода может служить высокая степень потенциальной опасности при работе со сверхвысокими давлениями, высокой температурой, техническим кислородом, а также высокая стоимость как оборудования, так и эксплуатационных затрат.

### ***Обезвоживание осадков городских сточных вод (ГСВ) в геоконтейнерах***

Применение данной технологии обеспечивает глубокое обезвоживание осадка при сокращенных затратах и минимуме капитальных затрат. Метод занимает промежуточное положение между механическим обезвоживанием и иловыми площадками. Аналогично механическому обезвоживанию осадок обрабатывается флокулянтom и подается насосом в геотекстильный контейнер (геотубу), сшитый из прочного фильтрующего материала, объемом до 1500 м<sup>3</sup>. Свободная вода выходит через стенки контейнера сквозь мелкие поры геотекстиля. В результате этого происходит обезвоживание осадка; фильтрат, выходящий из контейнера, получается чистым и не содержит механических взвесей. Контейнеры размещаются на площадке с твердым покрытием и системой отвода фильтрата на ОС. Наливы сфлокулированного осадка в геоконтейнер повторяются несколько раз, до финального заполнения емкости.

После завершения активной стадии водоотдачи осадок, закачанный в геотекстильные контейнеры, продолжает обезвоживаться благодаря хорошей светопоглощающей способности геотекстиля и испарению через большую площадь поверхности контейнера. Кроме того, контейнер не впитывает атмосферные осадки, и шлам не подвергается повторному обводнению. Положительно на процесс обезвоживания влияет зимнее промораживание, в результате чего при оттаивании высвобождается дополнительное количество остаточной влаги. Благодаря обезвоживанию в контейнере обезвоженный осадок (шлам) становится материалом, удобным для погрузки и транспортировки. Контейнер может быть вскрыт (не используется повторно для этих же целей), и его содержимое вывозится. Может быть применено захоронение обезвоженного осадка на месте обезвоживания, в этом случае геоконтейнеры укладываются в несколько слоев друг на друга.

Метод позволяет оперативно и с минимальными капитальными вложениями реализовать эффективное обезвоживание осадка. Требуется минимальная площадь для размещения узла приготовления и дозирования раствора флокулянта (возможен контейнер, размещаемый рядом с площадкой обезвоживания). При применении данного метода не для захоронения на месте обезвоживания использованные геоконтейнеры необходимо утилизировать как отход.

Для осадков поверхностных сточных вод является наилучшей доступной технологией, так как для донных отложений водоемов, близких по составу, накоплен достаточный опыт.

### *Биосушка осадка*

Цель данной технологии — обеспечение сушки обезвоженного осадка с минимальными затратами энергии, которая заключается в высокоинтенсивном компостировании осадка, направленном на получение подсушенного биотоплива. Процесс проводится в туннелях с продувкой буртов компостируемой смеси через каналы в днище. Компостируемая смесь представляет собой обезвоженный осадок с добавлением готового компоста крупностью выше заданной, а также древесной щепы (оборотной, с добавлением свежей).

При компостировании (окислении органических веществ осадка) выделяется тепло, позволяющее разогревать осадок до 60° С и выше. Подача воздуха при технологии биосушки осуществляется противотоком через несколько туннелей, находящихся в разных фазах процесса. Свежий воздух подается в дозревающий туннель (и охлаждает его), затем проходит туннель в активной фазе и, максимально нагретый, быстро повышает температуру во вновь уложенном туннеле. Это обеспечивает быстрый процесс при высокой эффективности использования кислорода воздуха. Отходящий воздух очищается от аммиака (с его утилизацией в виде сульфата аммония), охлаждается (с отводом тепла на утилизацию), осушается, доочищается и выбрасывается в атмосферу. Осадок высушивается до четырех раз по объему, до содержания сточной воды 25–30%. Нагрузка по осадку на общую площадь сооружения — 5–7 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> в год.

С учетом очистки выбросов загрязнение воздуха находится под контролем. Биосушка осадка — один из немногих процессов, позволяющих рекуперировать часть аммонийного азота, содержащегося в осадке, при этом возвратные потоки на очистные сооружения небольшие. Данный метод является практически универсальным, не требует сложных установок и высококвалифицированного персонала.

Свойства высушенного осадка, даже несмотря на потерю части органического вещества, позволяют использовать его как низкокалорийное топливо (аналог торфа). Он также может быть вывезен на полигон, использован как удобрение и т. п.

Метод нуждается в древесной щепе, однако ее потребление не превышает 1,5% по весу от обрабатываемого осадка, так как щепка используется многократно.

Известны два объекта в Нидерландах, работающие уже свыше 10 лет с применением данной технологии.

### *Электроосмотическое обезвоживание*

Электроосмотическое обезвоживание является методом повышения содержания сухого вещества в обезвоженном осадке с небольшими дополнительными затратами энергии. Применяется в дополнение к устоявшимся технологиям и направлен на отделение части связанной с сухим веществом осадка воды, которая не отделяется с помощью флокулянтов и давления.

При его реализации используется эффект электрофореза, когда осадок (ранее уже обезвоженный) попадает в пространство между электродами, через которые



пропускается постоянный ток. В направлении возникающего электрофоретического потока воды может размещаться фильтрационная мембрана. Поскольку процесс идет с выделением тепла за счет сопротивления току, происходит разогрев обрабатываемого осадка до 55–65° С.

Данная технология обладает техническими и экономическими преимуществами по сравнению с устоявшимися технологиями. Содержание сухого вещества в обезвоженном осадке на 8–10 абс. % выше, чем при обычном обезвоживании, что соответствует 25–40 отн. %. Достижимое значение содержания сухого вещества (55–60 %) недостижимо для осадка городских сточных вод с помощью обычного обезвоживания. Побочный эффект разогрева осадка обеспечивает его обеззараживание.

Преимуществом метода для окружающей среды является уменьшение объема перевозимого и размещаемого осадка.

Препятствием к реализации данного метода могут служить существенный расход электроэнергии, необходимость использования выпрямителей тока, потенциальная электроопасность для персонала, связанная в том числе с применением постоянного тока. Кроме того, могут потребоваться сбор и очистка образующихся дурнопахнущих выбросов вследствие выделения летучих веществ в газовую фазу при нагреве осадка.

### **Перспективные направления обработки и утилизации осадков сточных вод**

Очень важным является представление о том, как, в каком направлении будут применяться и изменяться методы и технологии обработки осадков в перспективе на ближайшее десятилетие. Целью обработки осадков, как и в настоящее время, останется переводение осадков из потенциально опасного загрязнения в полезный рекультивируемый материал, способствующий улучшению состояния окружающей среды.

В настоящее время известны и применяются эффективные комбинации аппаратов и методов, позволяющие сократить объемы осадков и осуществить их обеззараживание. Сгущение и обезвоживание осадков являются наиболее важными и дешевыми процессами, поэтому их применение в перспективе будет возрастать. Однако не все процессы сгущения и обезвоживания осадков будут использоваться в равной мере. Например, сгущение на ленточных и барабанных сгустителях будет широко применяться, в то же время применение сепараторов, центрифуг, флотаторов для сгущения осадков городских сточных вод будет сокращаться — в связи с тем, что они расходуют больше электрической энергии и более сложны в эксплуатации. Однако будут широко применяться флотационные методы в различных процессах обработки осадков промышленных сточных вод, такие как выделение из осадков жиров и масел.

Аэробная стабилизация и анаэробное сбраживание — широко применяемые методы — и впредь будут применяться в процессах обработки осадков, как для их стабилизации, так и для обеззараживания и получения газов брожения для технологических нужд станций аэрации. Причем будут совершенствоваться

и получают применение методы аэробного автотермического сбраживания и стабилизации осадков. Будут также использоваться отдельные процессы аэробной стабилизации активного ила и анаэробного мезофильного сбраживания осадка первичных отстойников. Получат применение мезофильные процессы анаэробного сбраживания осадков с предварительным нагреванием осадка — и в связи с тем, что этот процесс позволяет осуществить обеззараживание осадков, сократить потребность в тепле для нагревания сбраживаемой массы в метантенках и увеличить производство биогаза. Анаэробные термофильные процессы вряд ли получат широкое применение — в связи с большим потреблением тепловой энергии по сравнению с мезофильными процессами и ухудшением водоотдающих свойств осадков.

В перспективе возрастет интерес к обработке сырых несброженных осадков, т. к. они могут использоваться как источники энергии в процессах компостирования, пиролиза, сжигания и утилизации.

Будет возрастать роль полимеров-флокулянтов в процессах сгущения и механического обезвоживания осадков. Наряду с этим будут применяться другие химические реагенты для кондиционирования осадков.

Тепловое кондиционирование осадков требует значительных расходов тепловой энергии и сложного оборудования, работающего под высоким давлением. Однако в связи с совершенствованием этого метода оснащение теплового кондиционирования и обеззараживания осадка может оставаться на уровне применяемого в настоящее время количества аппаратов.

Наиболее простым методом обезвоживания сброженных осадков является подсушка их на иловых площадках. Однако подсушка на иловых площадках — длительный процесс, требующий отчуждения значительных земельных участков, которые все труднее получать вблизи очистных сооружений. Добавка реагентов к осадкам или замораживание и оттаивание осадков позволяют увеличить нагрузку на иловые площадки, но это не исключает потребности в больших земельных участках, поэтому использование иловых площадок в перспективе будет уменьшаться. Кроме того, применение флокулянтов для улучшения водоотдающей способности осадков предопределяет использование более интенсивных методов механического обезвоживания.

Обезвоживание осадков на центрифугах получило широкое применение, но их использование останется на прежнем уровне, т. к. осадительные шнековые центрифуги являются дорогостоящими аппаратами и требуют повышенного расхода электроэнергии и квалифицированного персонала для их обслуживания. Больше применение получают ленточные фильтр-прессы, особенно совмещающие сгущение и обезвоживание в одном аппарате. Камерные фильтр-прессы — аппараты периодического действия, они требуют применения ряда вспомогательных механизмов и квалифицированного обслуживания. Обезвоживание осадков на камерных фильтр-прессах останется на уровне существующего. Они будут использоваться в основном для обезвоживания осадков промышленных производств и на крупных городских станциях аэрации. В перспективе получат более широкое применение комбинированные

методы обезвоживания и обеззараживания осадков, например, шнековые фильтр-прессы с подогреванием осадка в процессе обезвоживания.

Термическая сушка осадков, обработка их известью с одновременной пастеризацией, компостирование осадков являются эффективными процессами стабилизации, сокращения объема и обеззараживания осадков. В перспективе они получают большее применение. Для термической сушки используются барабанные сушилки, сушилки кипящего слоя инертного носителя, сушилки-грануляторы и др. Не все из них будут использоваться в равной мере, большее применение получают сушилки-грануляторы — аппараты, позволяющие получать высушенный осадок в виде гранул и предотвращающие образование пылевидных фракций осадков. В перспективе получают применение аппараты, совмещающие обезвоживание и термическую сушку осадков.

Широкое применение получают методы компостирования осадков, в частности, компостирование в аэрируемых штабелях. В перспективе будет использоваться компостирование механически обезвоженных сырых осадков. Эта технология включает в себя добавление к сырым осадкам извести, наполнителя и рециркулируемого компоста, однако позволяет сократить общие капитальные и эксплуатационные затраты.

Сжигание осадков позволяет сократить объемы осадков и транспортные расходы, но требует сложной системы газоочистки и применения громоздкого оборудования. Кроме того, сжигание исключает возможность утилизации осадков. Поэтому оно будет применяться на крупнотоннажных производствах с повышенным содержанием в осадках токсичных компонентов и тяжелых металлов.

В перспективе найдут применение новые конструкции аппаратов для обезвоживания и обеззараживания осадков, удаления из них тяжелых металлов и получения из осадков ценных продуктов. Среди них — комбинированные аппараты, совмещающие процессы сгущения и обезвоживания, обезвоживания и термообработки, пиролиза и плазмопиролиза и др.

В таблице 31 приведен прогноз применения основных методов обработки осадков на последующее десятилетие. Эффективная обработка осадков зависит от ряда факторов, таких как местные условия, характеристика обрабатываемого осадка, его состав и свойства, количество обрабатываемого осадка, тип применяемого оборудования, стоимость реагентов, количество потребляемой энергии для обработки, транспортные расходы, условия утилизации и т. п. Эти показатели могут отличаться не только для различных станций аэрации и разных регионов, но также для разных стран. Использование одних методов и аппаратов может быть более эффективным в одних странах и менее эффективным в других. Поэтому выбор метода обработки осадка в каждом конкретном случае опирается на технико-экономическое обоснование, как это указывалось ранее<sup>150</sup>.

<sup>150</sup> Туровский И. С. Осадки сточных вод...

Таблица 31. Изменение применяемости основных методов обработки осадков в последующем десятилетии

№ п/п	Наименование метода	Применяемость в будущем
<i>I. Уплотнение и сгущение</i>		
1	Гравитационное	Та же, как и в настоящее время
2	Применение ленточных и барабанных сгустителей	Будет увеличиваться
3	Применение комбинированных аппаратов для сгущения и обезвоживания	Будет увеличиваться
4	Флотация	Та же, как и в настоящее время
5	Применение сепараторов и сгущающих центрифуг	Будет уменьшаться
<i>II. Сбраживание и кондиционирование</i>		
6	Аэробная стабилизация	Та же, как и в настоящее время
7	Аэробная мезофильная стабилизация	Будет уменьшаться
8	Аэробная термофильная стабилизация	Будет увеличиваться
9	Анаэробное мезофильное сбраживание	Будет увеличиваться
10	Анаэробное термофильное сбраживание	Та же, как и в настоящее время
11	Тепловая обработка	Та же, как и в настоящее время
12	Применение флокулянтов	Будет увеличиваться
<i>III. Обезвоживание</i>		
13	Подсушка на иловых площадках	Будет уменьшаться
14	Обезвоживание на центрифугах	Та же, как и в настоящее время
15	Обезвоживание на ленточных фильтр-прессах	Будет увеличиваться
16	Обезвоживание на шнековых фильтр-прессах	Будет увеличиваться
17	Обезвоживание на камерных фильтр-прессах	Та же, как и в настоящее время
18	Обезвоживание на вакуум-фильтрах	Будет уменьшаться
19	Комбинированные методы обезвоживания и обеззараживания	Будет увеличиваться
<i>IV. Дезинфекция и сокращение массы осадков</i>		
20	Известковая обработка и пастеризация	Будет увеличиваться
21	Термическая сушка с применением различных аппаратов	Будет увеличиваться
22	Термическая сушка в сушилках-грануляторах	Будет увеличиваться
23	Компостирование различными методами	Будет увеличиваться
24	Сжигание осадков городских сточных вод	Будет увеличиваться
<i>V. Новые методы обработки осадков</i>		
25	Применение новых аппаратов для сгущения и обезвоживания	Будет увеличиваться
26	Использование комбинированных аппаратов для обезвоживания и термической сушки осадков	Будет увеличиваться
27	Новые процессы обеззараживания осадков	Будет увеличиваться
28	Технологии удаления тяжелых металлов из осадков	Будет увеличиваться
29	Пиролиз осадков	Будет увеличиваться

### Экономика замкнутого цикла на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ)

Одной из 42 стратегических инициатив Правительства России является «экономика замкнутого цикла». Это масштабная и межотраслевая задача, цель которой — решение фундаментальных проблем в сфере обращения с отходами. Сегодня принципы экономики замкнутого цикла имеют ключевое значение в мировом сообществе.

В сфере водоснабжения и водоотведения утилизация осадков сточных вод (ОСВ) является одной из наиболее значимых экологических проблем. Эта проблема представляет основную технологическую и экономическую сложность в процессе очистки сточных вод. Ее решение связано с рядом комплексных задач, включающих в себя выявление объемов накопленных и вновь образующихся ОСВ, определение наличия и количества в них различных поллютантов (веществ, которые при накоплении в атмосфере в высоких концентрациях могут вызывать ухудшение здоровья человека и животных), оценку экологических и экономических аспектов хранения ОСВ на иловых площадках, изучение возможности утилизации ОСВ в конкретном городе и районе (в том числе изучение потенциального спроса на продукцию из ОСВ), а также разработку адаптированных к конкретным условиям способов их утилизации. Проблема утилизации ОСВ общеотраслевая и затрагивает все предприятия сферы водопроводно-канализационного хозяйства в мире, где ежегодный объем ОСВ достигает около 4 млрд м<sup>3</sup> (рис. 68).

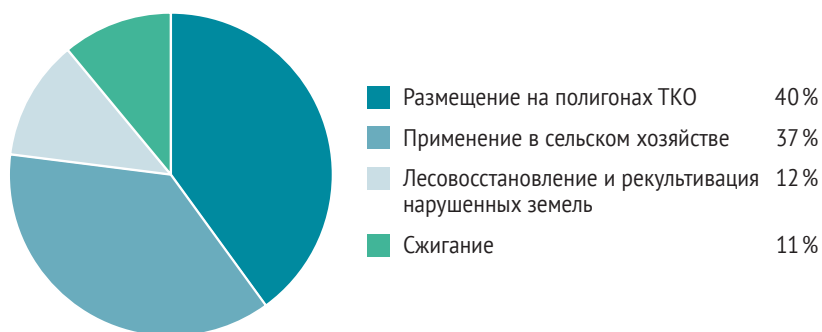


Рис. 68. Основные методы утилизации ОСВ в мире

В связи с возможным присутствием негативных факторов ОСВ могут стать потенциальной угрозой для жизни и здоровья населения. Среди этих факторов можно выделить:

- наличие яиц гельминтов, которые при благоприятных условиях могут заражать людей и животных;
- наличие бактерий и вирусов, таких как холерные вибрионы, вирусы тифа, паратифа и др.;

- наличие тяжелых металлов, которые могут находиться в подвижной, токсичной форме;
- выделение токсичных газов, таких как метан, сероводород, метилмеркаптан, аммиак и др.;
- распространение фекального запаха на расстояния, превышающие санитарно-защитную зону очистных сооружений.

Метод размещения ОСВ на полигонах твердых коммунальных отходов (ТКО) занимает ведущее место среди способов их утилизации, но также возможно использование ОСВ в хозяйственном и товарном обороте, благодаря высокому содержанию в них азота, фосфора, калия, органических веществ и микроэлементов, при условии их безопасной обработки.

С учетом роста населения и урбанизации по всему миру существует растущая потребность в возобновляемых ресурсах. В связи с этим Международная федерация водной окружающей среды приняла концепцию NER (Nutrient–Energy–Resources), предлагающую пересмотр традиционного подхода к очистке сточных вод с целью получения вторичных ресурсов, таких как энергия, питательные вещества, очищенная вода для хозяйственных нужд и вторичная продукция на основе обработанных ОСВ. Эта концепция также направлена на определение технологий, которые могут использоваться для получения новых видов ресурсов из ОСВ, в том числе для применения в качестве почвогрунтов и органических удобрений в различных отраслях: ландшафтное озеленение, дорожное строительство, благоустройство территорий, рекультивация нарушенных земель и полигонов ТКО, лесное хозяйство, сельское хозяйство.

В качестве примера успешной реализации данной концепции можно выделить опыт большинства стран-членов Европейского союза, в которых основным методом утилизации ОСВ является его применение в сельском хозяйстве в качестве органического удобрения (рис. 69).



Рис. 69. Основные методы утилизации ОСВ на территории ЕС по состоянию на 2019 г.

Большинство стран мира, включая развивающиеся, занимаются вопросом вовлечения обращения отходов производства (ОСВ) в хозяйственный оборот на нормативном и практическом уровнях. В Китае городским правительством

Шанхая была поставлена задача снизить количество ОСВ, размещенных на полигонах, с 86 до 7 % в среднесрочной перспективе. В Иране национальным комитетом по стандартизации Ирана ведется работа по разработке государственного стандарта в части вторичного использования обработанных ОСВ. В Объединенных Арабских Эмиратах из 30 % образующихся ОСВ производится компост, который вовлекается в экономический и хозяйственный оборот.

В Российской Федерации ежегодно образуется около 100 млн м<sup>3</sup> ОСВ, которые в основном складированы на иловых картах. Однако эти карты заполнены на 90–95 %, т. к. отсутствует возможность вывоза или использования ОСВ в качестве вторичного сырья. Условия складирования необработанных ОСВ не предотвращают загрязнения поверхностных и подземных вод, почв и растительности. Если есть возможность вывоза ОСВ с территории очистных сооружений, то они преимущественно размещаются на полигонах ТКО без предварительной обработки.

Хотя установлены соответствующие государственные стандарты, использование обработанных ОСВ в качестве почвогрунтов для хозяйственных и муниципальных нужд не получило широкого распространения из-за экономических факторов. Регулятор, устанавливая тариф, не учитывает требуемых расходов на утилизацию накопленных ОСВ в себестоимости, и, соответственно, в бюджетах предприятий ВКХ не хватает денежных средств для реализации данных мероприятий.

Несмотря на то что существует соответствующая нормативно-правовая база (Приказ Роспотребнадзора № 629 от 09.08.2019 г. «О совершенствовании эпидемиологического надзора за паразитозами в Российской Федерации»), это также не позволяет предприятиям ВКХ полностью осуществлять работы по дезинфекции накопленных ОСВ из-за недостатка необходимых финансовых ресурсов, связанного с тем, что существующая система ценообразования в сфере водоотведения не позволяет предприятиям ВКХ полностью решать вопрос утилизации накопленных ОСВ за счет тарифной составляющей.

Из-за разрушения почв, уменьшения верхнего плодородного слоя и потребностей в рекультивации нарушенных земель в России существует высокий спрос на почву и органические удобрения. Это также связано с потребностью в почве для благоустройства городской среды. В 2019 г. Департамент растениеводства Минсельхоза РФ сообщил, что из почвы с урожаем сельскохозяйственных культур было вынесено 61,3 млн т действующего вещества трех основных элементов минерального питания, при этом внесено органическими и минеральными удобрениями 25 млн т действующего вещества.

Таким образом, применение на очистных сооружениях канализаций технологий по переработке ОСВ во вторичное сырье или продукцию позволит минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, удовлетворить потребность хозяйствующих субъектов в почвогрунтах, исключив необходимость снятия плодородного слоя почвы, избежать дополнительных расходов бюджетов всех уровней, произвести освобождение территорий для муниципальных нужд, а также снизить зависимость хозяйствующих субъектов от использования минеральных удобрений.

При переработке ОСВ, вне зависимости от применяемой технологии, необходимо предусмотреть оформление полного комплекта экологической документации для того, чтобы не только фактически, но и юридически подтвердить переход ОСВ из отхода в сырье или продукцию.

Германия демонстрирует замкнутый цикл экономики, где нет отходов, а только вторичные материальные ресурсы. Европейские страны особенно заинтересованы в рекуперации фосфора, так как зависят от его импорта. В Германии оцениваются возможности возврата фосфора в экономический цикл путем его извлечения из осадков сточных вод. Изменения в законодательстве до 2023 г. должны обеспечить разработку мер по рекуперации фосфора из иловых осадков, которые затронут 560 крупнейших очистных сооружений, таких как Remondis Aqua. При использовании осадков сначала оценивают почвенный покров земельного участка, на котором планируется внесение осадков, их смесей или приготовленного компоста. Агрохимические исследования определяют тип почвы, содержание фосфатов и тяжелых металлов, а также pH. После исследований компетентный орган разрешает размещение.

### РОЛЬ ОТРАСЛИ ВОДООТВЕДЕНИЯ В ЭКОНОМИКЕ

Чистая и доступная вода является неотъемлемой частью жизни, но не менее важно обустроить и грамотную систему отведения и очистки сточных вод. Известно, что отсутствие канализации во все времена приводило к антисанитарии и, как следствие, вспышкам эпидемий.

Со второй половины XX в. во всем мире прослеживается четкая тенденция к росту потребления воды примерно на 1 % в год. Несмотря на резкий рост населения, в первую очередь спрос на воду растет в промышленном секторе экономики. Если общие тенденции сохранятся, то к середине XXI в. спрос на воду превысит сегодняшний уровень на 20–30 %.

Канализование и очистка сточных вод призваны снизить общую нагрузку на водные объекты и тем самым предотвратить деградацию или полную гибель водных источников<sup>151</sup>.

Общая санитария, наравне с доступом к чистой воде, выделена ООН в шестую цель устойчивого развития (ЦУР 6) и сформулирована как «обеспечение наличия и рационального использования водных ресурсов и санитарии для всех». Задачи, которые необходимо решить для достижения цели 6, охватывают мероприятия по улучшению качества воды, повышению эффективности использования водных ресурсов и защите связанных с водой экосистем, таких как горы, леса, болота, реки, озера. Достижение этой цели предусматривает повышение эффективности водопользования и очистки сточных вод, а также применение технологий рециркуляции и повторного использования воды.

---

<sup>151</sup> Данилов-Данильян В. И. и др. Экологическая безопасность = Ecological safety: общие принципы и российский аспект : учеб. пособие. — 2-е изд., дораб. — М. : МППА БИМПА, 2007.



Для реализации ЦУР 6 в части водоотведения требуется постоянное увеличение мощности ввиду динамичного нарастания объемов водопотребления<sup>152</sup>.

К стоимостной оценке водоотведения, с учетом большой социальной составляющей отрасли, неприменимо большинство стандартных подходов, таких как корреляция с показателями валового внутреннего продукта (ВВП). Вместе с тем динамика водоотведения коррелирует с общей динамикой водопользования, которая, к сожалению, часто не соответствует темпам общеэкономического развития (рис. 70).

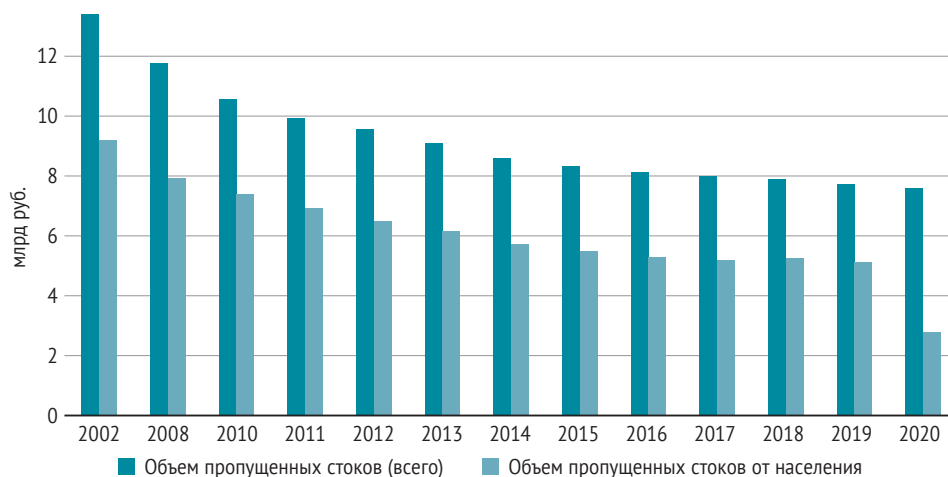


Рис. 70. Динамика объемов потребления услуг ВКХ (водоотведение), млрд руб.

Федеральный закон от 07.12.2011 г. «О водоснабжении и водоотведении» (№ 416-ФЗ) дает определение организаций водопроводно-канализационного хозяйства как осуществляющих эксплуатацию централизованных систем холодного водоснабжения и (или) водоотведения, отдельных объектов таких систем. Деятельность этих организаций регулируется, а их услуги тарифицируются. Регулирование строится на следующих принципах:

- 1) приоритетность обеспечения населения питьевой водой, горячей водой и услугами по водоотведению;
- 2) создание условий для привлечения инвестиций в сферу водоснабжения и водоотведения, обеспечение гарантий возврата частных инвестиций;
- 3) обеспечение технологического и организационного единства и целостности централизованных систем горячего водоснабжения, холодного водоснабжения и (или) водоотведения;
- 4) достижение и соблюдение баланса экономических интересов организаций, осуществляющих горячее водоснабжение, холодное водоснабжение и (или) водоотведение, и их абонентов;

<sup>152</sup> Добровольный национальный обзор об осуществлении Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. — 2020.

- 5) установление тарифов в сфере водоснабжения и водоотведения исходя из экономически обоснованных расходов организаций, осуществляющих горячее водоснабжение, холодное водоснабжение и (или) водоотведение, необходимых для осуществления водоснабжения и (или) водоотведения;
- 6) обеспечение стабильных и недискриминационных условий для осуществления предпринимательской деятельности в сфере водоснабжения и водоотведения;
- 7) обеспечение равных условий доступа абонентов к водоснабжению и водоотведению;
- 8) открытость деятельности организаций, осуществляющих горячее водоснабжение, холодное водоснабжение и (или) водоотведение, органов государственной власти Российской Федерации, органов государственной власти субъектов Российской Федерации и органов местного самоуправления, осуществляющих регулирование в сфере водоснабжения и водоотведения.

При этом до сих пор не соблюдается принцип баланса экономических интересов и установления экономически обоснованных тарифов, в целом сфера ВКХ является убыточной. В связи с очевидным несоответствием роста цен на ресурсы (например, электроэнергию) и возможным повышением тарифа предприятия вынуждены идти на нецелевое расходование средств, забирая на покрытие издержек от операционной деятельности финансы, изначально заложенные на оплату энергоресурсов, ремонтные работы и пр.

Для организаций водно-коммунального хозяйства рынок банковского кредитования намного дороже среднего уровня (2,54% по водоотведению), что ведет к низкой инвестиционной привлекательности отрасли. Суммарный объем инвестиционных проектов, реализующихся в России в сфере водоснабжения и водоотведения, составляет порядка 57 млрд руб. (около 880 млн дол. США). Все проекты, реализующиеся в сфере водоотведения, относятся к муниципальному уровню, что обуславливает критическую значимость государственного финансирования проектов в отрасли.

### **Водная стратегия Российской Федерации**

Для водохозяйственного комплекса России базовым документом стратегического планирования и развития стала Водная стратегия Российской Федерации, предназначенная для развития положений Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 г., утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 17 ноября 2008 г.

В период до 2020 г. Россия реализовывала Концепцию обеспеченности водными ресурсами населения и экономики. Соответственно финансирование напрямую зависело от таких параметров, как обеспеченность водой отраслей экономики и народонаселения, сохранность экологического благополучия и снижение негативного воздействия на водные ресурсы. При этом большая часть финансирования обеспечивалась федеральным

бюджетом (порядка 73 % от общего объема инвестиций) и бюджетами субъектов Российской Федерации (порядка 17 % от общего объема инвестиций), остальная часть погашалась местными бюджетами, инвестициями и т. д. При этом средства использовались не только на строительство и модернизацию объектов, но и на проведение фундаментальных и прикладных научных исследований, направленных на разработку технологий, обеспечивающих инновационное развитие водохозяйственного комплекса.

В настоящее время основные задачи отрасли водоотведения и очистки сточных вод сформулированы только в государственных докладах, что затрудняет концептуальное развитие, постановку целей и оценку результатов.

Остро стоит вопрос с обеспечением водными ресурсами отраслей экономики. Чистая вода расходуется на промышленные, питьевые и бытовые нужды, орошение и сельскохозяйственное водоснабжение. Основным направлением использования свежей воды является промышленное водоснабжение. В 2020 г. его объем<sup>153</sup> составил 24,68 млрд м<sup>3</sup>. При этом вопросам очистки сточных вод и внедрения оборотного водоснабжения на производствах до сих пор уделяется недостаточно внимания.

Водопользователи, осуществляющие добычу полезных ископаемых, имеют относительно небольшой объем оборотного и повторно-последовательного водоснабжения. Причем в абсолютном выражении соответствующее значение сократилось с 13,9 млрд м<sup>3</sup> в 2010 г. до 8,7 млрд м<sup>3</sup> в 2015 г., а относительно общегосударственного объема показатель снизился с 9,9 до 6,2 %. В 2017 г. этот объем составил почти 8,4 млрд м<sup>3</sup>, а доля рассматриваемой отрасли равнялась 6 %; в 2018 г. — соответственно, 8,7 млрд м<sup>3</sup>, или 6 %.

Объекты, относящиеся к виду экономической деятельности «Обрабатывающие производства», в 2005 г. изъяли из природных водных объектов почти 6,5 млрд м<sup>3</sup>, в 2010 г. — свыше 5,6 млрд м<sup>3</sup>, в 2015 г. — 4,18 млрд м<sup>3</sup> воды (доля в общем показателе по стране снизилась за приведенный период с 8 до 6 %). В 2017 г. водозабор<sup>154</sup> был на уровне 3,9 млрд м<sup>3</sup> (менее 6 %), а в 2018 г. — почти 4,1 млрд м<sup>3</sup>, что также составило около 6 %, в 2020 г. — 4,04 млрд м<sup>3</sup>.

На обрабатывающие производства приходится самый большой объем оборотного и повторно-последовательного водопользования среди всех видов экономической деятельности. В 2005 г. соответствующее значение равнялось 48,3 млрд м<sup>3</sup> (36 % от общего показателя по всем отраслям экономики), в 2010 г. — 43,8 (31 %), в 2015 г. — 45,1 млрд м<sup>3</sup> (32 %).

Наиболее ресурсоемким является энергетический сектор экономики, на который приходится и значительная доля оборотного и повторно-последовательного водоснабжения. Объем оборотного и повторно-последовательного использования воды в 2005 г. был равен 64,8 млрд м<sup>3</sup> (48 % от общегосударственного уровня), в 2010 г. — 80,0 млрд м<sup>3</sup> (57 %), в 2015 г. — 83,1 млрд м<sup>3</sup> (60 % от данного показателя по всем видам деятельности).

<sup>153</sup> Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». — М. : Росводресурсы ; НИА-Природа, 2022.

<sup>154</sup> Там же.

По виду экономической деятельности «Сбор, очистка и распределение воды» водозабор природной воды и сброс сточных вод в водные объекты осуществлялся главным образом водопроводно-канализационными хозяйствами городов и поселков<sup>155</sup>. Соответствующие данные по забору воды составили: в 2005 г. — 12,9 млрд м<sup>3</sup> (1% от общего значения по стране), в 2010 г. — 16,1 млрд м<sup>3</sup> (свыше 20%), в 2015 г. — 12,67 млрд м<sup>3</sup> (18,5%).

Если характеризовать водоотведение, то на рассматриваемый вид деятельности в 2005 г. приходилось 8,38 млрд м<sup>3</sup> загрязненных сточных вод, сброшенных в поверхностные водоемы, или 47% от их суммарного поступления по всем видам деятельности; в 2010 г. — 8,18 млрд м<sup>3</sup>, или почти 50%; в 2015 г. — 6,77 млрд м<sup>3</sup>, или 47%. Можно констатировать, что соответствующий канализационный сброс грязных стоков в водоемы России по рассматриваемому виду деятельности за указанные годы ощутимо сократился.

К приведенным данным, отражающим сбросы коммунальной канализации по виду деятельности «Сбор, очистка и распределение воды», до 2017 г. в принципе следует добавлять объем аналогичных сточных вод, которые отражались по виду деятельности «Предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг» (подвид деятельности «Удаление сточных вод, отходов и аналогичная деятельность»). Соответствующие значения такие: в 2005 г. — 1,88 млрд м<sup>3</sup>; в 2010 г. — 1,95 млрд м<sup>3</sup>; в 2015 г. — 1,72 млрд м<sup>3</sup>.

В обновленной версии ОКВЭД в 2017 г. был введен обобщенный вид экономической деятельности «Водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений», объединяющий сведения по водопроводам и канализациям коммунального и близкого им характера. Общий водозабор из водных источников составил в 2017 г. по хозяйственным объектам этой отрасли 11,6 млрд м<sup>3</sup> (около 17% от общероссийского объема), а объем сброса загрязненных стоков в поверхностные водоемы — 8,0 млрд м<sup>3</sup> (почти 59%); в 2018 г., соответственно, 12,1 млрд м<sup>3</sup> (около 17%) и свыше 8,1 млрд м<sup>3</sup> (почти 62% от всего объема таких сточных вод в стране).

Поступление в водоемы загрязненных сточных вод от хозяйственных объектов отрасли «Транспорт и связь» в 2010–2016 гг. было относительно невелико (порядка 0,03 млрд м<sup>3</sup>, или менее 1% объема по всем учтенным предприятиям и организациям России).

В 2017 г. показатель сброса загрязненных стоков по объектам, отнесенным к виду деятельности «Транспортировка и хранение», составил 0,09 млрд м<sup>3</sup> (менее 1%); в 2018 г., соответственно, менее 0,03 млрд м<sup>3</sup> (порядка 0,2% от всего объема такого рода стоков в России).

В разрезе видов экономической деятельности наибольший объем сброса сточных вод в водоемы регистрируется по виду деятельности «Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха». В 2020 г.

<sup>155</sup> Сиваев С. Б. Муниципальная тарифная политика // Некоммерческий фонд реструктуризации предприятий и развития финансовых институтов : информационный бюллетень. — 1999. — Вып. VII. — С. 11–18.

данный показатель был равен 17,03 млрд м<sup>3</sup>, в 2019 г. он составлял 19,27 млрд м<sup>3</sup> (сокращение сброса 11,66%). Текущий показатель — 49,74% от общего объема сброса сточных вод в Российской Федерации.

Второе место по объему сброса сточных вод занимает вид деятельности «Водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений»: в 2020 г. данный показатель был равен 9,18 млрд м<sup>3</sup>, в 2019 г. — 9,26 млрд м<sup>3</sup>, что меньше на 1,1%. Этот показатель составляет 26,81% от общего объема сброса сточных вод в Российской Федерации.

Значительные объемы водоотведения зафиксированы по виду деятельности «Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство», а именно 3,31 млрд м<sup>3</sup> в 2020 г., в 2019 г. — 4,41 млрд м<sup>3</sup>.

Относительно небольшие объемы сбросов присутствуют по таким видам экономической деятельности, как «Обрабатывающие производства» — 2,70 млрд м<sup>3</sup> (в 2019 г. — 2,75 млрд м<sup>3</sup>), «Добыча полезных ископаемых» — 1,38 млрд м<sup>3</sup> (в 2019 г. — 1,36 млрд м<sup>3</sup>).

В целом наблюдается процесс постепенного снижения объемов сброса сточных вод.

Таким образом, при наличии естественных ресурсов поверхностных и подземных вод многие источники, в том числе крупные, практически исчерпали возможность устойчивого развития без рационализации водопользования, экономии воды и восстановления качества водной среды. При этом необходимо признать наличие существенных рисков, препятствующих развитию водной отрасли, связанных с финансовым состоянием водохозяйственного комплекса в России. Это, например, недостаточный уровень финансирования развития водохозяйственного/водоохранного комплекса, что может привести к снижению водоотдачи водохозяйственных систем, ухудшению экологического состояния водных объектов, повышению рисков чрезвычайных ситуаций техногенного характера и росту ущерба от негативного воздействия вод. Сложившаяся и весьма ощутимая дифференциация финансовых возможностей субъектов Российской Федерации приводит к различной степени эффективности и результативности исполнения их собственных полномочий в сфере водных отношений<sup>156</sup>.

Подавляющее большинство этих субъектов дотационное. Более того, целый ряд территорий, в том числе испытывающих дефицит водных ресурсов или негативное воздействие вод на население и хозяйственные объекты, относится к высокодотационным регионам страны. Ограниченность возможностей региональных бюджетов в целом ряде случаев снижает эффективность исполнения ими собственных полномочий в сфере водопользования, приводит к росту межрегиональных различий в области обеспеченности населения качественной водой и защиты от негативного воздействия вод.

Минимизация указанных и некоторых других рисков (опасностей) должна обеспечиваться путем осуществления мероприятий по совершенствованию

<sup>156</sup> Сиваев С. Б. Жилищно-коммунальный комплекс. Между политикой и экономикой : экспертно-аналитический доклад. — М., 2018.

государственного планирования и регулирования, в том числе по повышению инвестиционной привлекательности и экономическому стимулированию проведения водохозяйственных и водоохраных (водосберегающих) работ. В частности, в области межрегиональных различий финансовых возможностей субъектов Российской Федерации минимизация рисков возможна на основе дифференциации условий софинансирования региональных проектов по строительству и капитальному ремонту гидротехнических сооружений (ГТС), находящихся в собственности субъектов Российской Федерации, с учетом уровня бюджетной обеспеченности конкретных российских регионов.

Устойчивое и качественное водоснабжение будет оставаться ключевым фактором обеспечения комфортной жизни людей и развития экономики. Процессы деградации природной среды из-за усиления воздействия антропогенных факторов — вызов для социально-экономического развития общества. Основные пути выхода из сложившейся ситуации — уменьшение загрязнения водной среды, улучшение санитарных условий проживания человека и повышение качества управления водными ресурсами. Решение стоящих перед обществом задач невозможно без участия государства. Реализация Национального проекта «Экология» и других программ направлена на сбалансированное развитие экономики, позволяющее минимизировать негативное воздействие на водные объекты, и обеспечение населения питьевой водой.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Айсаев А. А.* Отведение и очистка сточных вод Санкт-Петербурга / А. А. Айсаев, М. И. Алексеев. — Санкт-Петербург : Новый журнал, 2002. — 683 с.
2. *Бартонек А.* Златообильные Микены / А. Бартонек ; пер. с чеш. — Москва : Наука, 1991. — 352 с.
3. *Благодарумова А. М.* Обработка и обезвреживание осадков городских сточных вод: учеб. пособие. Ч. 1. / А. М. Благодарумова ; СибГИУ. — Новокузнецк, 2010. — 139 с.
4. *Бойко В. П.* Очерки истории водоснабжения и водоотведения (теоретический, практический и социокультурный аспекты) / В. П. Бойко, Е. Ю. Осипова, А. Ф. Рехтин, О. А. Сутягина, А. И. Кармалов ; под ред. В. П. Бойко. — Томск : Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. — 164 с.
5. *Ботук Б. О., Федоров Н. Ф.* Канализационные сети и сооружения / Б. О. Ботук, Н. Ф. Федоров. — Москва : Стройиздат, 1977. — 256 с.
6. *Большаков Н. Ю.* Оптимизация технологического процесса в системе аэротенк–отстойник для минимизации сброса органических веществ и биогенных элементов : дис. ... канд. техн. наук / Н. Ю. Большаков. — Санкт-Петербург, 2005. — 183 с.
7. *Бродель Ф.* Структуры повседневности: возможное и невозможное. — Т. 1: Материальная цивилизация, экономика и капитализм, XV–XVIII вв. / Ф. Бродель ; пер. с фр. — Москва : Прогресс, 1986. — 622 с.
8. *Василенко Л. В.* Методы очистки промышленных сточных вод : учеб. пособие / Л. В. Василенко, А. Ф. Никифоров, Т. В. Лобухина ; УГЛТУ. — Екатеринбург, 2009. — 174 с.

9. Водоснабжение и водоотведение в Санкт-Петербурге / под ред. д-ра техн. наук, проф. Ф. В. Кармазина. — Санкт-Петербург : Новый журнал, 2008. — 464 с.
10. Водоснабжение и водоотведение. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. — 532 с.
11. *Воронов Ю. В.* Водоотведение и очистка сточных вод / Ю. В. Воронов, С. В. Яковлев. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. — 704 с.
12. *Воронов Ю. В.* История отрасли и введение в специальность «Водоснабжение и водоотведение» : учебн. / Ю. В. Воронов, Е. А. Пугачев. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2012. — 392 с.
13. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». — Москва : Росводресурсы ; НИА-Природа, 2022. — 510 с.
14. *Гудков А. Г.* Биологическая очистка городских сточных вод : учеб. пособие / А. Г. Гудков. — Вологда, 2002. — 127 с.
15. *Гудков А. Г.* Механическая очистка сточных вод : учеб. пособие / А. Г. Гудков ; ВоГТУ. — Вологда, 2003. — 152 с.
16. *Данилов-Данильян В. И.* Экологическая безопасность = Ecological safety: Ecological safety: общие принципы и российский аспект : учеб. пособие / В. И. Данилов-Данильян, М. Ч. Залиханов, К. С. Лосев. — 2-е изд., дораб. — Москва : МППА БИМПА, 2007. — 286 с.
17. *Данилович Д. А.* Расчет и технологическое проектирование сооружений биологической очистки городских сточных вод в аэротенках с удалением азота и фосфора / Д. А. Данилович, А. Н. Эпов. — Москва, 2020. — 225 с.
18. Добровольный национальный обзор об осуществлении Повестки дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. — 2020. — 240 с.
19. *Жмур Н. С.* Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. — Москва : АКВАРОС, 2003. — 512 с.
20. *Зуева С. Б.* Экозащитные технологии систем водоотведения предприятий пищевой промышленности : учеб. пособие / С. Б. Зуева, С. С. Зарцына, В. И. Щербаков. — Санкт-Петербург : Проспект Науки, 2018. — 328 с.
21. *Игнатьева Л. П.* Санитарная охрана водных объектов : учеб. пособие / Л. П. Игнатьева, М. О. Потапова ; ФГБОУ ВО ИГМУ Минздрава России, кафедра коммунальной гигиены и гигиены детей и подростков. — Иркутск, 2016. — 97 с.
22. ИТС 10-2019. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. — 2019. — 416 с.
23. Канализация Москвы: десять лет в новом веке / Мосводоканал. — Москва : Современная полиграфия, 2008. — 391 с.
24. *Карагезов Ф. Г.* Обезвоживание осадков сточных вод : автореф. дис. ... канд. техн. наук. 05.23.04 / Ф. Г. Карагезов. — Москва, 1989. — 25 с.
25. *Кармазинов Ф. В.* Ультрафиолетовые технологии в современном мире / Ф. В. Кармазинов, С. В. Костюченко, Н. Н. Кудрявцев, С. В. Храменков. — Долгопрудный : Изд. дом «Интеллект», 2012. — 392 с.
26. *Линд Г.* Вода и город / Г. Линд. — Москва : Гидрометеиздат, 1984. — 72 с.
27. *Лыкова О. В.* Биофильтры, их преимущества и недостатки / О. В. Лыкова, Е. С. Гогина // Вестник МГСУ. — 2009. — № S1. — С. 114–117.
28. *Миронов В. В.* Биотермокомпостирование органических отходов / В. В. Миронов, А. А. Седых, А. В. Миронов, К. В. Палюткина // Техника и технологии в животноводстве. — 2019. — № 4 (36).
29. *Мишуков Б. Г.* Использование мембранных технологий в процессах глубокой очистки городских сточных вод / Б. Г. Мишуков, Е. А. Соловьева // Инновации и инвестиции. — 2017. — № 11. — С. 175–178.
30. МУ 2.1.5.732-99. Водоотведение населенных мест. Санитарная охрана водоемов.

31. *Николаев И. С.* Акведуки античного Рима / И. С. Николаев ; Моск. архитектурный ин-т (Гос. акад.). — Москва : Принт-Сервис, 2011. — 508 с.
32. *Новикова О. К.* Обработка осадков сточных вод : учеб.-метод. пособие / О. К. Новикова ; Мин-во транспорта и коммуникаций Республики Беларусь ; БелГУТ. — Гомель, 2015. — 96 с.
33. Обработка и утилизация осадков городских сточных вод : учебник / Э. П. Доскина и др. ; ВолГТУ. — Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. — 220 с.
34. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван ; пер. с англ. — Москва : Мир, 2006. — 480 с.
35. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 г. № 1430 «Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов».
36. Постановление Правительства РФ от 29.07.2013 г. № 644 «Об утверждении Правил холодного водоснабжения и водоотведения и о внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ».
37. Процессы, аппараты и техника защиты окружающей среды. Ч. I. Очистка промышленных сточных вод : учеб. пособие / В. И. Легкий, И. Н. Липунов, А. Ф. Никифоров, И. Г. Первова ; Урал. гос. лесотехн. ун-т. — Екатеринбург, 2016. — 234 с.
38. *Пупырев Е. И.* Вода и власть / Е. И. Пупырев. — Москва : Экспо-Медиа-Пресс, 2014. — 124 с.
39. *Рублевская О. Н.* Обработка и утилизация осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга: опыт и перспективы / О. Н. Рублевская // Водоснабжение и санитарная техника. — 2018. — № 10. — С. 47–51
40. *Серпокрылов Н. С.* Экология очистки сточных вод физико-химическими методами / Н. С. Серпокрылов, Е. В. Вильсон, С. В. Гетманцев, А. А. Марочкин. — Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. — 264 с.
41. *Сиваев С. Б.* Жилищно-коммунальный комплекс. Между политикой и экономикой : экспертно-аналитический доклад. — Москва, 2018. — 120 с.
42. *Сиваев С. Б.* Муниципальная тарифная политика / С. Б. Сиваев // Некоммерческий фонд реструктуризации предприятий и развития финансовых институтов : информационный бюллетень. — 1999. — Вып. VII. — С. 11–18.
43. СП 32.13330.2018. Канализация. Наружные сети и сооружения.
44. *Теплых С. Ю.* Технология компостирования осадка иловых полей очистных сооружений / С. Ю. Теплых, В. В. Тополова // Градостроительство и архитектура. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 143–153.
45. Технический справочник по обработке воды. В 2 т. Т. 2 ; пер. с фр. — Санкт-Петербург : Новый журнал, 2017. — 1695 с.
46. *Трунов П. В.* Особенности процесса очистки сточных вод в погружных мембранных биореакторах / П. В. Трунов // Коммунальное хозяйство городов. — 2010. — № 93. — С. 133–137.
47. *Туровский И. С.* Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание / И. С. Туровский. — Москва : ДеЛи принт, 2008. — 376 с.
48. *Хисамеева Л. Р.* Обработка осадков городских сточных вод : учеб. пособие / Л. Р. Хисамеева, А. С. Селюгин, Р. Н. Абитов, А. В. Бусарев, Н. С. Урмитова. — Казань : Изд-во Казанск. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. — 105 с.
49. *Храменков С. В.* 100 лет канализации Москвы / С. В. Храменков, В. А. Загорский, И. В. Курятникова и др. ; Мосводоканал. — Москва : Прима-Пресс, 1998. — 502 с.
50. *Храменков С. В.* Бестраншейные методы восстановления водопроводных и водоотводящих сетей : учеб. пособие для вузов / С. В. Храменков, О. Г. Примин, В. А. Орлов. — Москва : ТИМР, 2000. — 179 с.



51. *Шувалов М. В.* Диалектика совокупности теоретических, методологических и нормативных положений, применяемых для проектирования канализации поселений / Градостроительство и архитектура. — 2018. — № 2. — С. 35–45.
52. Экологические основы охраны водных ресурсов : учеб. пособие / А. Ф. Никифоров, А. С. Кутергин, В. С. Семенищев, С. В. Никифоров. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. — 192 с.
53. Экспериментальные методы в очистке сточных вод / гл. ред. англ. текста М. ван Лосдрехт, П. Х. Нильсен, К. Лопес-Васкес, Д. Брджанович ; пер. с англ. Н. В. Кахаевой. — Томск : Изд-во Томск. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. — 346 с.
54. Энергосбережение как критерий выбора воздухоудвки : журнал НДТ ВС и ВО. — 2012. — № 12. — 13 с.
55. *Янцен О. В.* Выбор эффективной технологии утилизации осадков сточных вод / О. В. Янцен, Н. С. Севрюгина, В. А. Герасимов, А. П. Сторожев // Природообустройство. — 2020. — № 5. — С. 117–123.
56. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse / Metcalf & Eddy, Inc. — 4th ed., revised. — 1927 p.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблемы, связанные с водообеспечением экономики и населения, а также с охраной окружающей природной среды от загрязнения, защитой и реабилитацией селитебных зон, имеют весьма масштабный и острый характер. Эти проблемы во многом обусловлены неравномерным распределением водных ресурсов по территории страны, их значительной гидрологической изменчивостью в различные годы, достаточно высокой степенью их загрязнения и накопленной деградации. Более того, во многих случаях в наименее водообеспеченных регионах речной сток характеризуется наибольшей многолетней вариацией, поэтому в отдельные годы фактические ресурсы здесь нередко существенно меньше среднемноголетних значений.

В частности, если суммарные естественные водные ресурсы рек европейской части России — Днепра, Волги, Дона, Кубани, Самура, Сулака, Терека, Урала — в средний по водности год принять за 100 %, то в маловодные годы данное значение может составлять всего 60 %. При этом если ориентироваться на ту часть водных ресурсов, которая способна гарантировать устойчивое водоснабжение объектов экономики и населения (т. е. на минимальный меженный сток), то для бассейнов названных и ряда других рек она составляет лишь порядка 20 % от их ресурсов в средний по водности год. Иначе говоря, располагаемые объемы оказываются гораздо меньше потребностей в воде в названных бассейнах. Следует учитывать, что одним из факторов, определяющих актуальность проблемы, является не только выраженная неравномерность естественно-географического распределения по территории страны водных ресурсов. Главное — это то, что оно не соответствует плотности населения, а также масштабам и уровню хозяйственной деятельности (прежде всего выпуска товаров и услуг, связанных с повышенным водопотреблением) во многих регионах.

Имеется целый ряд других проблем общего плана, требующих реализации масштабных мероприятий текущего и долгосрочного характера в области совершенствования организации водопользования. Очевидно, что и в настоящее время, и в перспективе в первую очередь следует решать региональные проблемы, имеющие место в конкретных водохозяйственных бассейнах страны, на конкретных участках водных объектов и т. д. При этом целесообразно исходить из ряда задач, основными из которых являются:

- разработка, корректировка (при необходимости) и реализация региональных программ по наиболее актуальным для конкретного субъекта Российской Федерации направлениям водохозяйственной и водоохранной деятельности, по обеспечению санитарно-эпидемиологического благополучия населения, его защиты от вредного воздействия вод, с одной стороны, и обеспечения качественной питьевой водой, с другой, и т. д. (в первую очередь в рамках национальных проектов);
- совершенствование регионального контроля и надзора за последовательным и неуклонным выполнением намеченных программ;
- принятие мер по повышению ответственности юридических лиц, качества плановых и внеплановых надзорных мероприятий;
- организация четкого межведомственного взаимодействия контрольных и иных структур (в том числе управленческого характера) в рассматриваемой сфере;
- систематический контроль качества питьевого водоснабжения, состояния водоемов.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю. А. Рахманин</i> [Вместо предисловия] .....	5
<i>Д. О. Скобелев</i> [Обращение к читателю] .....	7
Введение .....	10
<b>1 ВОДОСНАБЖЕНИЕ</b> .....	<b>17</b>
<i>Г. А. Самбурский, Т. М. Портнова, Ю. Н. Бурвикова</i>	
История зарождения отрасли .....	19
Эволюция технологий .....	30
История зарождения отрасли в России .....	41
Описание технологий .....	98
Сравнение технологий .....	142
Отходы и вторичные ресурсы .....	184
Роль отрасли в глобальной экономике .....	186
Прогноз развития технологий .....	198
Список источников .....	212
<b>2. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД</b> ..	<b>215</b>
<i>И. Г. Казакова, И. О. Тихонова</i>	
Вода в природе .....	217
Подземные воды .....	225
Циклы развития водоснабжения за счет подземных вод .....	286
Эволюция технологий развития водоснабжения за счет подземных вод .....	294
Список источников .....	296

<b>3. ВОДООТВЕДЕНИЕ</b> .....	299
<i>О. Н. Рублевская, А. И. Клоков, А. Е. Кузнецов</i>	
История зарождения отрасли .....	301
Эволюция технологий .....	311
Общие характеристики системы канализации РФ .....	355
Описание технологий .....	380
Энергоэффективность .....	422
Сравнение технологий очистки сточных вод .....	429
Отходы и вторичные ресурсы .....	441
Роль отрасли водоотведения в экономике .....	488
Список источников .....	494
<b>Заключение</b> .....	498

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
«ЦЕНТР ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ»

<https://eipc.center/>

---

*Справочное издание*

**ЭНЦИКЛОПЕДИЯ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

**2.0**



**ТЕХНОЛОГИИ  
ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Главный редактор *Д. О. Скобелев*

Ответственный редактор *О. С. Ежова*

*Изображение на обложке: Freerik.com*

Технический редактор *А. Б. Левкина*

Дизайн обложки *Т. Б. Тиунова*

Редактор *О. К. Чеботарева*

Корректор *Л. А. Брисовская*

Оригинал-макет *Л. А. Харитонов*

Подписано в печать 07.12.2023. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 40,8. Тираж 100 экз. Заказ № 281Р.

Отпечатано в типографии издательско-полиграфической фирмы «Реноме»,  
192007, Санкт-Петербург, наб. Обводного канала, д. 40.

Тел. (812) 766-05-66. E-mail: [book@renomespb.ru](mailto:book@renomespb.ru)

ВКонтакте: [https://vk.com/renome\\_spb](https://vk.com/renome_spb)

[www.renomespb.ru](http://www.renomespb.ru)



