

Б.Н. Фрог А.Г. Первов

ВОДОПОДГОТОВКА



Б.Н. Фрог, А.Г. Первов

ВОДОПОДГОТОВКА

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов РФ по образованию в области строительства в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по программе бакалавриата по направлению подготовки 270800 – «Строительство» (профиль «Водоснабжение и водоотведение»)



Издательство Ассоциации строительных вузов
Москва
2014

УДК 628.16
ББК 38.761.1
Ф 91

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой
Технологии воды и топлива НИУ «МЭИ» *А.А. Пантелеев*;
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией глубокой
очистки воды ОАО НИИ ВОДГЕО *А.Д. Смирнов*.

Фрог Б.Н., Первов А.Г.

Водоподготовка. Учеб. для вузов: – М.: Издательство Ассоциации
строительных вузов, 2014. – 512 с.

ISBN 978-5-93093-974-3

В учебнике представлены сведения по составу природных вод и выбору метода очистки воды для хозяйственно-питьевых и производственных нужд.

Даны классификации различных методов обработки воды в зависимости от типа природной воды и решаемой задачи по ее использованию. Значительное внимание уделено вопросам специальной обработки воды: удалению из воды загрязнений антропогенного происхождения, нитратов и нитритов, фтора, железа, марганца, а также ее умягчению, опреснению и обессоливанию. Описаны новые для современной водоподготовки мембранные методы, используемые для осветления, умягчения, опреснения и обессоливания воды – ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос, электродеионизация. Представлены основные типы оборудования водоподготовки и их характеристики, а также методы расчета сооружений водоподготовки и примеры проектов станций.

Предназначается для студентов, обучающихся по программе бакалавриата, направление 270800 «Строительство», профиль «Водоснабжение и водоотведение».

УДК 628.16
ББК 38.761.1

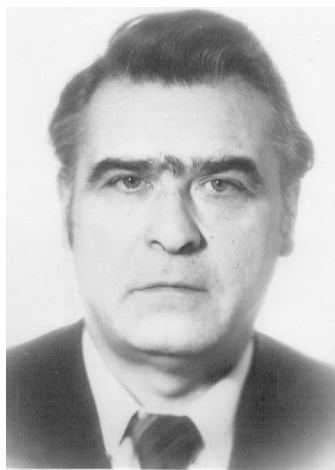
ISBN 978-5-93093-974-3

© Фрог Б.Н., Первов А.Г., 2014
© Издательство АСВ, 2014

Эту книгу авторы посвящают
памяти своих отцов-учителей
и наставников –
Николая Петровича Фрога,
Германа Григорьевича Первова



Фрог Николай Петрович
25.01.1914 – 08.07.2011



Первов Герман Григорьевич
17.05.1929 – 27.03.1999

Предисловие

Интенсивное развитие промышленности и энергетики, сельского и коммунального хозяйства, значительный рост водопотребления, возросшие требования к качеству воды обуславливают строительство новых систем и сооружений водоснабжения, расширение и реконструкцию существующих. В связи с этим будущий инженер, получающий образование по специальности «Рациональное использование водных ресурсов и обезвреживание промышленных стоков», должен иметь четкие представления не только об отдельных элементах водоснабжения, их значении и взаимосвязи, но и овладеть теоретическими основами процессов и методов улучшения качества воды, приобрести практические навыки по расчету, проектированию и эксплуатации водоочистных сооружений.

Настоящая книга является учебником по курсу «Водоподготовка», а также учебным пособием по курсам «Технологии очистки природных вод» и «Водоснабжение промышленных предприятий». Она будет полезна также при дипломном и курсовом проектировании.

Программа подготовки специалистов по специальности «Водоснабжение» включает ознакомление с современными методами опреснения и обессоливания. Однако для глубокого изучения этих методов не выделяется достаточно времени. Учебники по водоснабжению до настоящего времени также не содержали материал в объеме, достаточном для изучения новых современных технологических схем, видов оборудования и умения провести технический и технологический расчет сооружений для умягчения, опреснения и обессоливания воды с использованием методов дистилляции, электродиализа, обратного осмоса и ультрафильтрации.

Настоящий учебник «Водоподготовка» предлагает учебно-методические материалы, способствующие изучению и освоению новейших технологий водоподготовки и содержит теоретическое описание процесса и его моделирование, используемые материалы, устройство и конструкции аппаратов, методы расчета и подбора сооружений, технологический расчет всех элементов технологических схем.

Основные теоретические положения, которые легли в основу современных технологий очистки воды (ее осветления, умягчения, обессоливания, обеззараживания и т.д.), были разработаны в 50–60-х гг. прошлого века. Большой вклад в разработку теоретических основ процессов очистки воды, разработку технологии и методов расчета сооружений внесли выдающиеся отечественные специалисты: С.Х. Азерьер, Е.Н. Тетеркин, Турчинович, В.А. Клячко, И.Э. Апельцин, А.А. Кастальский, Д.М. Минц, Е.Ф. Кургаев,

С.А. Шуберт, А.И. Егоров, Р.И. Аюкаев, С.Н. Линевич, А.Н. Фоминых, В.В. Найденко, В.А. Гладков, Г.И. Николадзе, М.Г. Журба и др.

В учебнике использованы разработки таких крупнейших производственных, проектных и научных организаций, как ММП «Мосводоканал», Союз водоканал проект, НИИ ВОДГЕО, Мосводоканал НИИ Проект, ГипрокоммунВодоканал, Совинтервод, НИИ КВОВ, Теплоэлектропроект (ТЭП), ВТИ, ВНИИАМ, а также зарубежный опыт.

В изложении материала глав учебника при описании процессов осветления использованы работы В.А. Клячко, И.Э. Апельцина, И.М. Миркиса, В.В. Ашанина (НИИ ВОДГЕО), В.Г. Корабельникова (НИИ КВОВ), фильтрации – Д.М. Минца (НИИ КВОВ), дегазации – А.А. Кастальского (МГСУ), основы теории и практик обезжелезивания представлены на основе работ Г.И. Николадзе (МГСУ).

При описании методов опреснения и обессоливания использованы работы В.А. Клячко, И.Э. Апельцина, Г.Г. Первова, Л.Д. Ушакова (НИИ ВОДГЕО) – в области электролиза, Ф.Н. Карелина (НИИ ВОДГЕО), Ю.И. Дытнерского (РХТУ им. Менделеева) – в области обратного осмоса.

При описании технологий дистилляционного опреснения, а также технологий предотвращения накипеобразования и расчетов карбонатных и сульфатных равновесий в дистилляционных и других опреснительных установках использованы работы И.Э. Апельцина, А.А. Говерта, Г.Г. Жабина (НИИ ВОДГЕО). Описание вопросов стабилизационной обработки воды основано на работах И.Э. Апельцина, В.А. Гладкова, Д.Д. Кучеренко, Л.С. Алексеева, А.А. Говерта (НИИ ВОДГЕО).

Тепловые расчеты испарительных аппаратов основаны на работах Л.С. Стермана (МЭИ). Описание современных технологий ионного обмена основано на работах Ф.Г. Прохорова (ВТИ), при описании методов расчета ионообменных установок использованы материалы Э.И. Лифшиц (ВНИПИЭнергопром).

Главы 1.1, 1.2, разделы 2 и 3 написаны д.х.н. проф. Б.Н. Фрогом. Введение, главы 2.2 и 16, разделы 3–5 написаны д.т.н. проф. А.Г. Первовым. Глава 12 написана к.т.н. доц. А.П. Андриановым.

Авторы выражают глубокую признательность и благодарность за помощь и консультации при подготовке материалов и написании глав Е.Б. Юрчевскому, Г.Г. Жабину – гл. 1, Д.В. Спицову, И.С. Балаеву, Б.Е. Рябчикову – гл. 23, 26, Г.Я. Рудаковой, Л.С. Алексееву – гл. 16. Особую благодарность авторы выражают Е.А. Позняковой и Л.В. Рудаковой за большую работу, проделанную при подготовке книги к печати.

Замечания и предложения читателей, направленные на улучшение настоящего учебника, будут приняты авторами с благодарностью.

Введение

Процессы, используемые при очистке воды (коагулирование примесей, осаждение, фильтрование, процессы окисления сорбции, ионного обмена и мембранного переноса) – те же процессы, которые используются в различных химических технологиях. Поэтому при разработке технологий очистки воды и расчете аппаратов и сооружений используются методы, основанные на тех же закономерностях, что и в химических технологиях.

Несмотря на огромное разнообразие продуктов применения химических технологий, получение их связано с поведением однотипных процессов – таких как перемешивание, нагрев, охлаждение, осаждение, химическое взаимодействие и др. Эти процессы характеризуются общими законами гидравлики, физической химии, химической кинетики и др.

Сходством характеризуются и аппараты (сооружения), применяемые в различных отраслях химической технологии, в том числе и в технологиях обработки воды. Например, внешне похожи аппараты для фильтрования, сорбционной обработки, ионного обмена. Наука о процессах и аппаратах химической технологии изучает общность различных процессов и аппаратов и обобщает методы их расчетов. В одноименном курсе изучают физико-химическую сущность и теорию процессов, характерных для всех отраслей химической технологии, а также принципы выбора и методы расчета аппаратов, предназначенных для проведения этих процессов.

Однако процессы и сооружения, используемые при обработке воды, представленные в курсах «Водоподготовка», «Водоснабжение», «Водоснабжение промышленных предприятий» в строительных вузах, изучаются более подробно и полно с учетом специфики составов и поведения водных растворов, условий их эксплуатации и строительства. Вода помимо удаляемых загрязнений содержит ряд веществ, бактерий, растворенных газов, которые ведут к коррозии оборудования и труб, к образованию отложений, которые заметно снижают эффективность процессов очистки воды и работы существующих сооружений и аппаратов.

Помимо теории ведения процесса курс водоподготовки описывает многообразие процессов, происходящих в водной среде, и дает практические рекомендации по преодолению ряда побочных процессов, необходимые при эксплуатации сооружений водоподготовки.

Это выгодно отличает курс «Водоподготовка» от зарубежного курса «Chemical Engineering» и «Процессы и аппараты химической технологии», преподаваемого в РХТУ им. Менделеева.

По мере развития курсов «Водоснабжение» и «Технологии очистки воды» используются новые обозначения, упрощенные методы расчета, основанные на эмпирических уравнениях, мало уделяется места описанию теории процесса. Часто даже специалистами путаются понятия «процесс», «метод» и «технология». Например, технология осветления воды (т.е. удаление из нее мутности и снижение цветности). Название процесса отождествляют с методом и технологией. Например, говорят процесс «обезжелезивания». Между тем проблема удаления железа – это цель, которая решается с помощью целой технологической схемы, включающей ряд различных процессов и сооружений. Например, для обезжелезивания используется ряд процессов: аэрации (окисления), кристаллизации (образование коллоидов гидрооксида железа), фильтрований, происходящих в различных аппаратах (сооружениях): дегазаторах, фильтрах. Также технология осветления природной воды основана на последовательном применении процессов смешения, коагулирования, отстаивания, фильтрования. Учащиеся часто путают метод осветления и осветлитель-аппарат для осветления (осветления процесса коагуляции). На самом деле осветлитель – лишь одно из сооружений технологической схемы осветления воды. Основная сложность курса водоподготовки – необходимость объединения в технологическую цепочку сразу нескольких процессов для достижения заданного результата, при этом необходимо также знание основ, возможностей и областей применения каждого из процессов.

Авторы сочли необходимым представить понятия «процессы» и «технологии» так, как это преподносится в курсе «Процессы и аппараты».

Под *процессом* понимают изменение состояния вещества, происходящее в определенных условиях.

В окружающей нас природе наблюдаются явления, которые называют *естественными* процессами.

На основе данных, полученных в результате естественных процессов и анализа достижений науки и техники, разрабатывают и реализуют многочисленные промышленные процессы с целью производства продуктов потребления. Такие процессы называют *производственными* или *технологическими* процессами.

Изучение технологических процессов составляет предмет и задачу *технологии* – науки, определяющей условия практического применения законов естественных наук (физики, химии, механики и др.) для наиболее эффективного проведения разнообразных технологических процессов. Технология непосредственно связана с про-

изводством, а производство постоянно находится в развитии, поэтому технологии постоянно совершенствуются.

Многие технологические процессы могут быть реализованы с помощью различных *методов* в соответствующем *аппаратурном оформлении*. Например, технологический процесс умягчения (удаления из воды ионов жесткости) может быть осуществлен ионообменными методами (натрий-катионированием и др.), реагентными методами или мембранными методами. Технология осветления воды может использовать коагуляционные методы (осветление в слое взвешенного осадка, контактного осветления) или мембранные методы. Выбор метода, условий его применения и аппаратного оформления осуществляют на основе критериев оптимизации.

В принятой ранее классификации изучались в основном задачи – главные технологические процессы – осветления, обезжелезивания, умягчения, обессоливания. Поскольку такие задачи могут быть решены различными методами (коагуляционными, ионообменными, мембранными), описание технологий часто приводило к повторам, например умягчение и обессоливание решаются одними и теми же ионообменными методами, а осветление, обезжелезивание, умягчение и обессоливание – мембранными методами.

В настоящей работе предпринята попытка классификации процессов, дано описание отдельных процессов, далее для каждого процесса описываются его возможности, области применения в водоподготовке; методы, основанные на применении этих процессов, аппараты и методы их расчетов. После усвоения процессов описываются решаемые задачи, методы и технологические схемы, использующие эти процессы, для решения различных задач.

За последние десятилетия существенно выросли экологические проблемы, стоящие перед человечеством. Неуклонный рост производства ведет к загрязнению окружающей среды. Системы водоподготовки также имеют серьезные отходы, загрязняющие окружающую среду. К этим отходам относятся: шлам из осветлителей, сбросные минерализованные регенерационные растворы после установок ионного обмена, промывные воды фильтровальных установок, рассолы и концентраты мембранных установок опреснения и обессоливания воды. Системы водоподготовки требуют для своей работы большого количества химических реагентов (для коагуляции воды, для регенерации аппаратов, для предотвращения отложений в аппаратах и трубопроводах и др.), которые попадают в сточные воды и загрязняют окружающую среду.

Знание возможностей различных процессов позволяет выбирать оптимальные технологические режимы работы технологических процессов водоподготовки (с минимальным потреблением реагентов, с минимальным расходом воды на собственные нужды и ее сбросом в окружающую среду) и успешно решать экологические проблемы.

Проблемой получения веществ без каких-либо отходов занимается *нанотехнология* – новое направление науки, изучающее принципы «построения» или «складывания» из атомов «мозаики» – продуктов с заданными свойствами.

В водоподготовке к *нанотехнологиям* относятся *мембранные технологии*: благодаря использованию мембран с размером пор, соизмеримым с размером молекул воды, природные и сточные воды могут быть очищены от растворенных ионов солей, железа, жесткости, органических веществ. При этом процесс очистки идет без применения химических реактивов и без образования минерализованных стоков.

В настоящем учебнике мембранные методы рассматриваются «на равных» с другими традиционными процессами и методами, используемыми в водоподготовке: представлены основные виды оборудования и методы их подбора, расчета и проектирования. Хотя мембранные методы стали применяться в водоподготовке сравнительно недавно, реконструкция и проектирование новых производств в настоящее время ведутся исключительно с применением мембран, поэтому эти технологии становятся «технологиями будущего».

РАЗДЕЛ 1. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРИРОДНОЙ ВОДЫ И ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ЕЕ ОБРАБОТКИ

Глава 1. Выбор метода водоподготовки

1.1. Влияние примесей воды на ее качество

Природные воды представляют собой сложную многокомпонентную динамическую систему, в состав которой входят: соли (преимущественно в виде ионов, молекул и комплексов), органические вещества (в молекулярных соединениях и в коллоидном состоянии), газы (в виде молекул и гидратированных соединений), диспергированные примеси, гидробионты (планктон, бентос, нейстон, пагон); бактерии и вирусы. Во взвешенном состоянии в природных водах содержатся глинистые, песчаные, гипсовые и известковые частицы, в коллоидном состоянии – различные вещества органического происхождения, кремнекислота, гидроксид железа (III), фульвокислоты, гуматы, в истинно растворенном состоянии – в основном минеральные соли, обогащающие воду ионами.

Химический состав природных вод, под которым понимается сложный комплекс минеральных и органических веществ в разных формах ионо-молекулярного и коллоидного состояния, подразделяется на пять групп: главные ионы, содержащиеся в наибольшем количестве (натрий Na^+ , калий K^+ , кальций Ca^{2+} , магний Mg^{2+} , сульфаты SO_4^{2-} , карбонаты CO_3^{2-} , хлориды Cl^- , гидрокарбонаты HCO_3^-); растворенные газы (азот N_2 , кислород O_2 , оксид углерода CO_2 , сероводород H_2S и др.); биогенные элементы (соединения фосфора, азота, кремния); микроэлементы – соединения всех остальных химических элементов; органические вещества.

Размеры взвешенных веществ варьируются от коллоидных до грубодисперсных частиц (*табл. 1.1*).

Л.А. Кульским предложена классификация примесей воды, основанная на их фазовом состоянии и дисперсности. *Примеси воды разделены на четыре группы.*

Примеси первой группы проникают в воду вследствие эрозии слагающих ложе водоема пород и смыва с поверхности почв. Они представляют собой нерастворимые в воде суспензии и эмульсии (а также планктон и бактерии), кинетически неустойчивые и находящиеся во

взвешенном состоянии благодаря гидродинамическому воздействию водного потока. В состоянии покоя эти примеси выпадают в осадок.

Таблица 1.1

Взвешенные вещества	Размер	Гидравлическая крупность, мм/с	Время осаждения частиц на глубину 1 м
Коллоидные частицы	$2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-8}$	4 года
Тонкая глина	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-5} - 17 \cdot 10^{-5}$	0,5–2 мес
Глина	$27 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	2 сут
Ил	$5 \cdot 10^{-2} - 27 \cdot 10^{-3}$	1,7–0,5	10–30 мин
Песок:			
мелкий	0,1	7	2,5 мин
средний	0,5	50	20 с
крупный	1,0	100	10 с

Примеси второй группы представляют собой гидрофобные и гидрофильные органические и минеральные коллоидные частицы, вымытые водой из грунтов и почв, а также нерастворимые и недиссоциированные формы гумусовых веществ, детергенты и вирусы, которые по своим размерам близки к коллоидным примесям.

Примеси третьей группы – это молекулярно-растворенные вещества (органические соединения, растворимые газы и т.п.).

Примеси четвертой группы представляют собой вещества, диссоциированные на ионы. В результате процесса гидратации кристаллическая структура этих веществ разрушается. Устойчивость образующихся гидроксидов металлов прямо пропорциональна их заряду и обратно пропорциональна радиусу.

Концентрация отдельных примесей в воде определяет ее свойства, т.е. качество. Различают показатели качества воды физические (температура, взвешенные вещества, цветность, запах, вкус и др.), химические (жесткость, щелочность, активная реакция, окисляемость, сухой остаток и др.), биологические (гидробийонты) и бактериологические (общее количество бактерий, коли-индекс и др.).

Для определения качества воды производят физические, химические, бактериологические, биологические и технологические анализы в наиболее характерные для данного водоисточника периоды года.

Из растворенных в природных водах газов существенное влияние на их свойства оказывают: оксид углерода (IV), кислород, сероводород, метан, азот. Их содержание в воде определяется природой

и парциальным давлением газа, составом водной среды, температурой. Кислород, оксид углерода, сероводород придают воде при определенных условиях коррозионные свойства по отношению к металлам и бетону. *Кислород* попадает в воду при ее контакте с воздухом. В артезианских водах кислород отсутствует, а в поверхностных водах содержание кислорода меньше теоретического за счет потребления его различными организмами, брожения, гниения органических остатков и т.п. Резкое снижение содержания кислорода в воде указывает на ее загрязнение.

Азот в природные воды проникает из воздуха, при разложении органических остатков, а также при восстановлении соединений азота денитрифицирующими бактериями. Образующийся в воде в процессе гниения растений аммиак оказывает влияние на технологию хлорирования воды.

Метан в природных водах, используемых для централизованного водоснабжения, обычно присутствует в незначительных количествах. Однако в подземных водах газонефтеносных районов и в болотных водах содержание метана доходит до 50 мг/л. При концентрации метана в воздухе 5,3–14% возникает взрывоопасная ситуация.

Оксид углерода (IV) присутствует во всех природных водах от нескольких мг/л (поверхностные воды) до сотен мг/л (подземные и шахтные воды). Оксид углерода (IV) в сочетании с гидрокарбонатами обуславливает буферные свойства воды. Угольная кислота встречается в природных водах в форме недиссоциированных молекул H_2CO_3 , гидрокарбонатных HCO_3^- и карбонатных CO_3^{2-} ионов.

Угольная кислота может находиться в свободном и в связанном состояниях. Под свободной угольной кислотой понимают сумму $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2$. Поскольку в природных водах концентрация недиссоциированных молекул угольной кислоты H_2CO_3 составляет лишь доли процента от общего количества свободной угольной кислоты, в качестве последней без заметной погрешности принимают концентрацию CO_2 .

В воде поверхностных источников содержание CO_2 не превышает 20–30 мг/л, в подземных неминерализованных водах – 90 мг/л. В подземных водах CO_2 появляется в результате процессов разложения органических соединений, а также в результате биохимических процессов.

Различные формы угольной кислоты в водных растворах связаны так называемым динамическим углекислотным равновесием

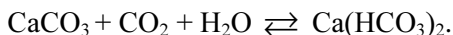


При наличии ионов Ca^{2+} углекислотное равновесие выражается уравнением



Избыточная свободная угольная кислота в отличие от равновесной очень активна и называется агрессивной.

Агрессивные свойства угольной кислоты объясняются ее способностью взаимодействовать с карбонатными породами и переводить их в растворимые в воде гидрокарбонаты

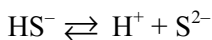


Присутствие в воде агрессивной угольной кислоты может ухудшать работу очистных сооружений за счет усиленного зарастания отстойников сине-зелеными водорослями и засорения фильтров пузырьками газа.

Сероводород встречается в основном в подземных водоисточниках, образуясь в результате процессов восстановления и разложения некоторых минеральных солей (гипса, серного колчедана и др.). В поверхностных водах он почти не встречается, так как легко окисляется. Появление его в поверхностных источниках может быть следствием протекания гнилостных процессов или сброса неочищенных сточных вод.

В зависимости от величины рН кроме газообразного растворенного H_2S в воде могут присутствовать ионы HS^- и S^{2-} . Соотношение форм сероводорода при различных рН воды приведено в *табл. 1.3*.

Форму сероводорода можно определить также по константам его диссоциации:



$$K_1 = \frac{[\text{H}^+] + [\text{HS}^-]}{[\text{H}_2\text{S}]}$$

$$K_2 = \frac{[\text{H}^+] + [\text{S}^{2-}]}{[\text{HS}^-]}$$

(при 25 °C $K_1 = 6 \cdot 10^{-8}$, $K_2 = 1 \cdot 10^{-4}$).

Наличие в воде сероводорода придает ей неприятный запах, ощущаемый уже при его концентрации 0,5 мг/л, интенсифицирует процесс коррозии трубопроводов и вызывает их зарастание вследствие развития серобактерий.

Взвешенные вещества попадают в воду в результате смыва твердых частичек (глины, песка, лесса, илистых веществ) верхнего покрова земли дождями или тальми водами во время весенних и осенних паводков, а также в результате размыва русел рек. Общее количество взвешенных веществ, содержащихся в воде, характеризуется такими показателями, как мутность и прозрачность (величина, обратная мутности), мг/л. Наименьшая мутность водоемов наблюдается зимой, когда они покрыты льдом, наибольшая – весной в период паводка, а также летом вследствие выпадания дождей, таяния снега в горах и развития мельчайших плавающих живых организмов и водорослей. Повышение мутности воды может быть вызвано выделением некоторых карбонатов, гидроксидов алюминия, марганца, высокомолекулярных органических примесей гумусового происхождения, появлением фито- и зоопланктона, окислением соединений железа (II) кислородом воздуха, сбросом неочищенных производственных сточных вод и др.

Взвешенные вещества имеют различный гранулометрический состав, который характеризуется гидравлической крупностью, выражаемой как скорость осаждения частичек при температуре 10 °С в неподвижной воде (см. *табл. 1.1*).

Наличие в воде взвешенных веществ препятствует использованию ее для хозяйственно-питьевых целей, в теплоэнергетике, на заводах для приготовления пищевых продуктов, при производстве бумаги, тканей, киноплёнки и проч. Согласно ГОСТ 2874-82 мутность питьевой воды по стандартной шкале должна составлять не более 1,5 г/л.

Органические вещества, присутствующие в природных водах, влияют на органолептические показатели их качества. Самыми значительными поставщиками органических веществ в природную воду являются почвенный и торфяной гумус, продукты жизнедеятельности и разложения растительных и животных организмов, сточные воды бытовых и промышленных предприятий.

Гуминовые и фульвокислоты могут находиться в почве в свободном состоянии, в виде солей с катионами щелочных и щелочно-земельных металлов, комплексных и внутрикислотных соединений с железом, алюминием, марганцем, медью и, наконец, в виде адсорбционных органо-минеральных соединений.

Для водоемов особую опасность представляют сточные воды, в составе которых есть белки, жиры, углеводы, органические кислоты, эфиры, спирты, фенолы, нефть и др.

Степень окраски природных вод, выражаемая в градусах платиново-кобальтовой шкалы, называется *цветностью*. Наибольшую цветность имеют природные поверхностные воды рек и озер, расположенных в зонах торфяных болот и заболоченных лесов, наименьшую – в лесостепных и степных зонах. Зимой содержание органических веществ в природных водах минимальное, однако в период паводков и паводков, а также летом в период массового развития водорослей – «цветения» водоемов – оно повышается.

Наличие в воде органических веществ резко ухудшает ее органолептические показатели, вызывая различного рода запахи (землистый, гнилостный, рыбный, болотный, аптечный, камфорный, запах нефтепродуктов, хлорфенольный и т.д.), повышает цветность, вспениваемость, оказывает неблагоприятное действие на организм человека и животных.

О содержании в природных водах солей можно судить по количеству сухого остатка и потере массы при прокаливании. Сухой остаток, образующийся при выпаривании определенного объема воды, предварительно профильтрованной через бумажный фильтр, состоит из минеральных солей и нелетучих органических соединений. Количество органических соединений в сухом остатке воды определяют по потере его массы при прокаливании.

Большое количество растворенных в воде солей ухудшает вкусовые качества воды, в результате чего она может приобретать соленый, горький, сладкий и кислый вкус, а также различные привкусы. Порог вкусового восприятия солевых добавок в воде характеризуется следующими концентрациями:

$\text{NaCl} - 165, \text{CaCl}_2 - 470, \text{MgCl}_2 - 135, \text{MnCl}_2 - 1,8,$

$\text{FeCl}_2 - 0,35, \text{MgSO}_4 - 250, \text{CaSO}_4 - 70, \text{MnSO}_4 - 15,7,$

$\text{FeSO}_4 - 1,6, \text{NaHCO}_3 - 450 \text{ мг/л.}$

Ионы Na^+ и K^+ попадают в природные воды в результате растворения коренных пород. Так, большое количество Na^+ поступает в воду в результате растворения залежей NaCl . Преобладание ионов Na^+ над ионами K^+ в природных водах объясняется большим поглощением калия почвами и извлечением его из воды растениями.

Жесткость воды обусловлена наличием в ней кальция и магния. Различают карбонатную, некарбонатную и общую жесткость воды.

Общая жесткость воды представляет собой сумму карбонатной (временной) и некарбонатной (постоянной) жесткости.

Карбонатная жесткость обусловлена присутствием в воде в основном гидрокарбонатов кальция и магния, она почти полностью устраняется при кипячении воды. Гидрокарбонаты при этом распадаются с образованием угольной кислоты; в осадок выпадает карбонат кальция и гидроксид магния.

Некарбонатная жесткость обусловлена присутствием кальциевых и магниевых солей серной, соляной и азотной кислот и при кипячении не устраняется. Хотя ионы Mg^{2+} и Ca^{2+} и не приносят особого вреда живым организмам, однако наличие их в воде в большом количестве нежелательно, поскольку такая вода непригодна для хозяйственных нужд. В жесткой воде увеличивается расход мыла при стирке белья, медленно развариваются мясо и овощи. Жесткая вода непригодна и для систем оборотного водоснабжения, для питания паровых котлов и проч.

Железо и марганец. Ионы Mn^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} в истинно растворенном состоянии находятся в очень небольших концентрациях. Большая часть железа и марганца в природных водах содержится в виде коллоидов и суспензий. В подземных водах преобладают соединения железа и марганца в виде гидрокарбонатов, сульфатов и хлоридов, в поверхностных – в виде органических комплексных соединений (например, гуминовокислых) или в виде высокодисперсной взвеси.

В поверхностных водах средней полосы России содержится от 0,1 до 1 мг/л железа и от 0 до 0,05 мг/л марганца, в подземных водах содержание железа часто превышает 15–20 мг/л, концентрация марганца колеблется в пределах 0,5–3 мг/л. Железо и марганец придают воде неприятную красновато-коричневую или черную окраску, ухудшают ее вкус, вызывают развитие железобактерий, отложение осадка в трубопроводах и их засорение. Избыток железа в организме увеличивает риск инфарктов, длительное употребление человеком железосодержащей воды вызывает заболевание печени, оказывает негативное влияние на репродуктивную функцию организма. Марганецсодержащие воды отличаются вяжущим привкусом, окраской, оказывают элериотоксическое и гонадотоксическое воздействие на организм человека.

Бор в питьевой воде в концентрации выше 0,5 мг/л негативно воздействует на человека, ухудшая обмен веществ и вызывая заболевание печени и желудочно-кишечного тракта.

Бром в питьевой воде при содержании свыше 0,2 мг/л уменьшает скорость проведения импульса по нервным волокнам, отрицательно сказывается на функции печени и почек, обуславливает снижение калия в крови и увеличивает содержание азота в мочевины.

Соединения азота встречаются в природной воде в виде нитритных (NO_2^-), нитратных (NO_3^-) ионов и ионов аммония (NH_4^+). Появление этих ионов в природных водах связано с разложением различных сложных органических веществ животного и растительного происхождения, а также с разложением белковых веществ, попадающих в водоемы с бытовыми сточными водами.

Нитраты содержатся главным образом в поверхностных водах (до 0,001–0,003 мг/л), *нитриты* – в артезианских (десятые доли миллиграмма в литре). При использовании питьевой воды с нитратами в количестве свыше 45 мг/л в организме человека синтезируются нитрозамины, способствующие образованию злокачественных опухолей, перерастающих в рак желудка, у детей возникает заболевание водно-нитратной метгемоглобинемией (нарушение окислительной функции крови).

Конечный продукт разложения белковых веществ – аммиак. Наличие в воде аммиака растительного или минерального происхождения не опасно в санитарном отношении. Если же аммиак образуется в результате разложения белка сточных вод, такая вода непригодна для питья. Содержание азота аммонийных солей в речной воде в зависимости от степени ее загрязнения колеблется от 0 до 1 мг/л.

Кремний присутствует в природных водах в виде ионов, молекул и коллоидных частичек. Форма содержания кремниевой кислоты в воде зависит от многих факторов, и в первую очередь от ее ионного состава и значения рН (табл. 1.3).

Кремниевая кислота H_2SiO_3 диссоциирует в две стадии:



Содержание кремния в природных водах в пересчете на SiO_3^{2-} – обычно достигает 0,6–40 мг/л и лишь в отдельных случаях может повышаться до 65 мг/л. Кремниевая кислота не вредна для здоровья, однако повышенное содержание ее в воде делает воду непригодной для питания паровых котлов из-за образования силикатной накипи.

Содержание хлоридов и сульфатов (ионов SO_4^{2-} и Cl^-) в природных водах колеблется в широких пределах (от долей миллиграмма до нескольких граммов на литр) и обусловлено вымыванием соледержащих пород или сбросом в водоемы промышленных и бытовых сточных вод. Наличие в воде более 350 мг/л хлоридов или 500 мг/л сульфатов придает ей солоноватый привкус и приводит к нарушению функционирования пищеварительной системы у людей. Вода с большим содержанием ионов SO_4^{2-} и Cl^- имеет также повышенную коррозионную активность, более высокую некарбонатную жесткость, разрушающе действует на железобетонные конструкции.

Под *общей щелочностью воды* подразумевается сумма содержащихся в воде гидроксильных ионов OH^- и анионов слабых кислот, например угольной (HCO_3^- , CO_3). Поскольку в большинстве природных вод преобладают карбонаты, обычно различают лишь *гидрокарбонатную* и *карбонатную щелочность*. При некоторых приемах обработки воды и при $pH > 8,5$ возникает *гидратная щелочность*.

Соединения фосфора встречаются в природных водах в виде суспендированных частиц минерального и органического происхождения, в виде ионов ортофосфорной кислоты или сложного органического комплекса. В природных водах соединения фосфора присутствуют в малых количествах, но оказывают существенное влияние на водную растительность. Концентрация соединений фосфора в питьевой воде не регламентирована.

Фтор в природных водах содержится до 12 мг/л (артезианские воды) и более. Однако подавляющее большинство источников централизованного водоснабжения в нашей стране характеризуется содержанием фтор-иона до 0,5 мг/л. Фтор является активным в биологическом отношении микроэлементом, содержание которого в питьевой воде во избежание кариеса или флюороза зубов должно быть 0,7–1,5 мг/л.

Иод в природных водах находится в ничтожно малых количествах. Он является очень важным биологическим микроэлементом, содержание которого в питьевой воде не должно быть менее 10^{-8} мг/л во избежание эндемического зоба.

Стронций в концентрации свыше 7 мг/л вызывает урскую болезнь, рахит, ломкость костей.

Кадмий в питьевой воде при содержании свыше 0,001 мг/л вызывает болезнь «Итай-итай».

При избытке ртути в питьевой воде (свыше 0,0005 мг/л) возникает болезнь Минамата.

Цинк в концентрациях свыше 5,0 мг/л угнетает окислительные процессы в организме, вызывает анемию.

Медь в питьевой воде в концентрации свыше 1 мг/л вызывает заболевание печени, гепатит и анемию.

Молибден при содержании в питьевой воде свыше 0,25 мг/л вызывает подагру и молибденовую болезнь.

Допустимые концентрации некоторых микроэлементов в хозяйственно-питьевой воде установлены ГОСТ 2874-82 и СанПиН 4630-88.

В состав природных вод могут входить также ионы радиоактивных элементов, поступающих в воду в результате вымывания радиоактивных минералов или в результате испытаний атомного оружия и сброса отработанных вод атомных реакторов. ГОСТ 2874-82 также ограничивает содержание радиоактивных элементов в питьевой воде.

Токсические вещества. Ионы As^{3+} , As^{5+} , Se^{6+} , Pb^{2+} и многие другие, относящиеся к ядовитым, в природных водах в естественном состоянии встречаются, как правило, в незначительных количествах и попадают в них в больших количествах в результате сброса неочищенных бытовых и промышленных сточных вод. Наличие в воде нескольких миллиграммов на литр ядовитых веществ оказывает вредное влияние на здоровье человека и теплокровных животных, а также губительное действие на рыб и их кормовые ресурсы, тормозит процессы самоочищения водоемов. К этой группе веществ относятся As, Be, Cu, Mo, Pb, Se, Sr, Zn и др., а также некоторые органические вещества.

Гидробионты, населяющие природные воды, в процессе жизнедеятельности влияют не только на состав окружающей водной среды, но и на качество воды. Они подразделяются на планктон – обитатели, пребывающие в толще воды от дна до поверхности; среди них различают плавающие, пассивно парящие и полуподводные (плейтон) организмы; взвешенные в воде остатки их органического и неорганического происхождения называют детритом; бентос – обитатели, находящиеся на дне водоема; среди них встречаются подвижно или неподвижно прикрепленные, свободно лежащие и ползающие по дну организмы, сверлящие дно, закапывающиеся. Нейстон – организмы, населяющие поверхностную пленку воды и адаптировавшиеся к жизни в специфических условиях ее поверхностного натяжения; пагон – организмы (моллюски, ракообразные, коловратки и др.), пребывающие зимой в толще льда в состоянии анабиоза, оживающие весной и находящиеся среди бентоса или планктона.

Оглавление

Предисловие	4
Введение	6
Раздел 1. Оценка качества природной воды и основных методов ее обработки	10
Глава 1. Выбор метода водоподготовки	10
1.1. Влияние примесей воды на ее качество	10
1.2. Требования к качеству воды, предъявляемые различными потребителями	21
1.3. Классификация основных методов водоподготовки, их назначение и области применения	26
1.4. Выбор метода водоподготовки. Технологические схемы и сооружение	32
Раздел 2. Сооружения станций водоподготовки из поверхностных водоисточников	36
Глава 2. Предварительная обработка воды	36
2.1. Фильтрование через сетки и ткани	36
2.2. Использование биологических процессов в водоподготовке: биореакторов и биосорберов. Конструкции, технологические схемы, расчет	42
2.3. Осаждение в поле центробежных сил. Гидроциклоны	47
Глава 3. Удаление мутности и цветности. Коагулирование примесей воды	54
3.1. Коагуляция. Физико-химические основы коагулирования примесей воды. Регулирование оптимальных условий коагуляции	54
3.2. Реагенты, используемые при водоподготовке для коагулирования примесей воды	64
3.3. Реагентное хозяйство. Системы хранения, приготовления и дозирования реагентов	71
3.4. Контактная коагуляция	75
Глава 4. Смешение реагентов с водой. Смесители	78

Глава 5. Хлопьеобразование. Камеры хлопьеобразования ...	84
Глава 6. Осветление воды осаждением.	
Теоретические основы. Виды отстойников, конструкции и их расчет	92
Глава 7. Осветление в слое взвешенного осадка.	
Осветлители. Конструкции и расчет	106
Глава 8. Обработка воды фильтрованием.	
Теоретические основы. Конструкции и расчет фильтров	121
8.1. Теоретические основы очистки воды фильтрованием через зернистые материалы	121
8.2. Фильтрующие материалы	125
8.3. Распределительные системы фильтровальных аппаратов	129
8.4. Расчет скорых фильтров	131
8.5. Промывка фильтровальных аппаратов	135
8.6. Современные конструкции фильтровальных аппаратов. Фильтры с плавающей загрузкой	138
Глава 9. Контактные осветлители, их конструкции и расчет	145
Глава 10. Флотация. Теоретические основы. Конструкции и расчет флотаторов	151
Глава 11. Электрокоагуляция. Теоретические основы. Аппаратное оформление процесса	156
Глава 12. Мембранная микроультрафильтрация для очистки природных вод	158
12.1. Типы мембран и мембранных аппаратов	158
12.2. Теоретические основы процесса ультрафильтрации	160
12.3. Конструирование и расчет мембранных установок ультрафильтрации	168

Глава 13. Проектирование систем оборота промывной воды скорых фильтров, контактных осветлителей и систем ультрафильтрации, обработка осадка	175
13.1. Оборот промывных вод очистных сооружений.....	175
13.2. Обработка и утилизация осадка промывных вод	175
Глава 14. Обеззараживание воды	179
14.1. Классификация методов обеззараживания воды	179
14.2. Хлорирование воды сильными окислителями	180
14.3. Обеззараживание воды бактерицидными лучами (ультрафиолетовое обеззараживание)	193
Глава 15. Дезодорация воды. Удаление из воды растворенных органических веществ	198
15.1. Привкусы и запахи воды.....	198
15.2. Дезодорация воды аэрацией	200
15.3. Удаление из воды привкусов и запахов с помощью окислителей	202
15.4. Дезодорация воды сорбцией.....	206
15.5. Окислительно-сорбционный метод обработки воды	209
Глава 16. Борьба с зарастанием и коррозией труб и оборудования систем водоснабжения. Стабилизационная обработка воды	212
16.1. Стабильность воды по карбонату кальция. Углекислотные равновесия.....	212
16.2. Индексы стабильности (Ланжелье, Ризнера, и Сноинка–Джексона).....	213
16.3. Коррозия труб. Борьба с коррозией	217
16.4. Стабилизационная обработка воды (ингибирование, подкисление, подщелачивание, контактная стабилизация, магнитная и ультразвуковая обработка)	218
Раздел 3. Сооружения станции водоподготовки из подземных источников	225
Глава 17. Удаление железа и марганца	225
17.1. Теоретические основы удаления из воды железа	225

17.2. Классификация методов обезжелезивания и их описание	228
17.3. Деманганация воды	237
Глава 18. Удаление из воды растворенных газов (углекислоты, кислорода, сероводорода)	244
Глава 19. Фторирование и дефторирование воды	257
Глава 20. Удаление из воды кремниевой кислоты	265
Раздел 4. Умягчение, опреснение и обессоливание воды	269
Глава 21. Теоретические основы умягчения воды, классификация методов	269
Глава 22. Реагентные и термохимические методы умягчения	272
Глава 23. Ионообменные методы умягчения	280
23.1. Теоретические основы процесса ионного обмена	280
23.2. Характеристики ионитов	281
23.3. Основные закономерности процесса ионного обмена	289
23.4. Регенерация ионитовых фильтров	295
23.5. Схемы установок ионообменного умягчения воды.....	302
23.6. Оборудование ионообменных установок	307
23.7. Технологические расчеты ионообменных фильтров в различных схемах умягчения воды.....	315
Глава 24. Опреснение воды, обессоливание воды, классификация методов и технологий опреснения	326
Глава 25. Выпаривание (дистилляционные методы)	330
25.1. Теоретические основы опреснения воды методом дистилляции	330
25.2. Классификация, принципы работы и схемы опреснительных дистилляционных установок	332
25.3. Накипеобразование в испарителях. Методы предотвращения накипеобразования	343

25.4. Общие принципы теплового расчета испарителей.....	352
25.5. Последовательность расчета многоступенчатых дистилляционных установок	356
25.6. Кондиционирование воды, полученной на дистилляционных установках	363
Глава 26. Ионный обмен. Ионообменные методы опреснения и обессоливания воды	364
26.1. Теоретические основы. Аниониты.....	364
26.2. Технологические схемы и оборудование для обессоливания воды методом ионного обмена.....	369
26.3. Технологические расчеты ионообменных установок для обессоливания воды	380
26.4. Технологические схемы опреснения воды методом ионного обмена	384
Глава 27. Мембранные методы умягчения, опреснения и обессоливания воды. Баромембранные и электромембранные методы	388
Глава 28. Электродиализ	391
28.1. Теоретические основы мембранного переноса. Параметры процесса.....	391
28.2. Мембраны для электродиализа	395
28.3. Устройство электродиализных аппаратов.....	398
28.4. Схемы электродиализных опреснительных установок.....	403
28.5. Расчет электродиализных опреснительных установок	405
Глава 29. Электродеионизация	413
Глава 30. Электродиализ на биполярных мембранах	421
Глава 31. Обратный осмос и нанофильтрация	423
31.1. Теоретические основы процесса	423
31.2. Основные параметры процесса обратного осмоса	426
31.3. Мембраны для обратного осмоса.....	428
31.4. Типы мембранных аппаратов и их конструкций	429
31.5. Разработка технологических схем предварительной обработки воды перед обратноосмотическими установками	435

31.6. Конструирование установок обратного осмоса.....	445
31.7. Технологические расчеты мембранных систем.....	455
31.8. Современные технологические схемы мембранных установок.....	457
Раздел 5. Специальные методы очистки воды	460
Глава 32. Антропогенные загрязнения. Выбор методов для специальной очистки воды	460
32.1. Удаление нитратов и нитритов	460
32.2. Удаление из воды аммиака и аммония.....	461
32.3. Удаление из воды бора и брома. Удаление бария, селена, стронция, мышьяка	464
32.4. Очистка воды от синтетических поверхностно-активных веществ (ПАВ).....	470
32.5. Удаление из воды пестицидов, гербицидов, ихтиоцидов и других веществ	471
32.6. Очистка воды от радиоактивных веществ.....	471
32.7. Доочистка сточных вод для использования в техническом водоснабжении	474
Раздел 6. Общие вопросы проектирования водоочистных комплексов	477
Глава 33. Проектирование водоочистных комплексов водоподготовки	477
33.1. Основы выбора технологической схемы, сооружений и реагентов	477
33.2. Высотная схема и планировка водоочистных сооружений	479
33.3. Принципы компоновки водоочистных комплексов	484
33.4. Примеры проектирования станций промышленной водоподготовки.....	487
Заключение.....	494
Литература	497
Об авторах	499

Учебное издание

Борис Николаевич **Фрог**
Алексей Германович **Первов**

ВОДОПОДГОТОВКА

Компьютерная верстка: *Е.В. Орлов*
Редактор: *В.Ш. Мерзлякова*
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.
Подписано к печати 05.12.13. Формат 60x90/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. 32 п.л. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@mgsu.ru, <http://www.iasv.ru/>