

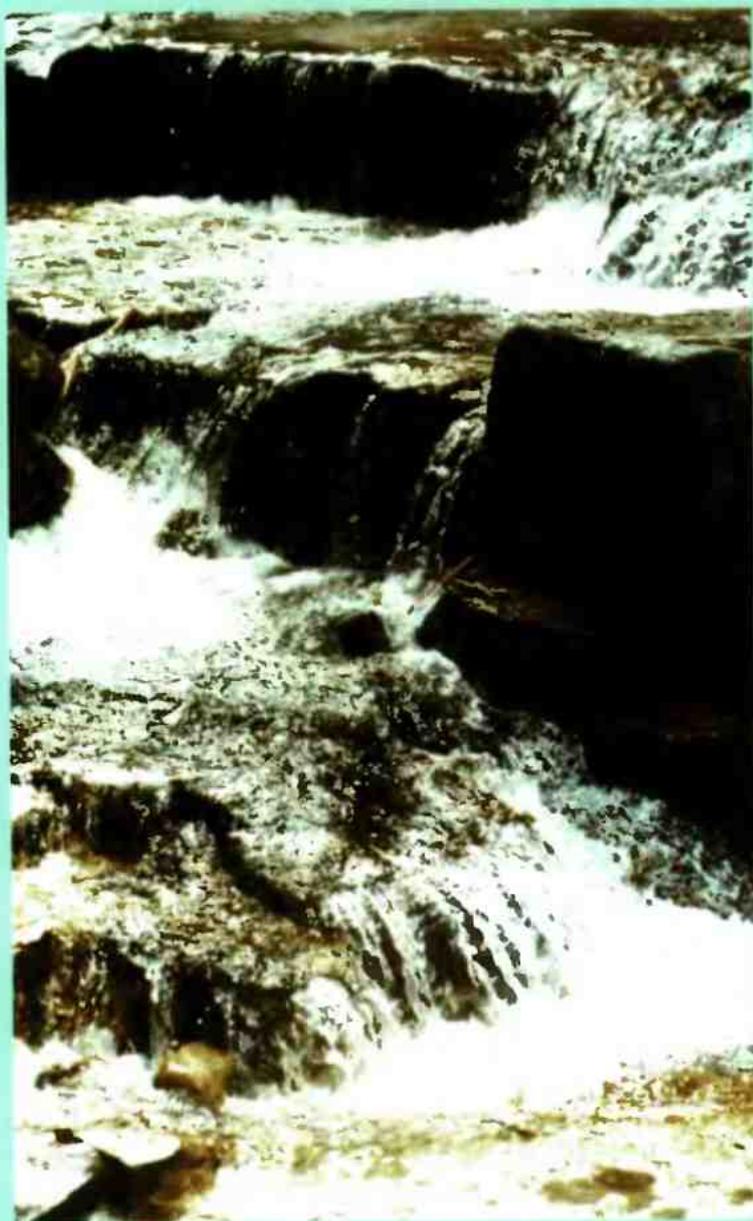
**Б.Е. Рябчиков**

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ  
ПОДГОТОВКИ ВОДЫ  
ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО И БЫТОВОГО  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

**Питьевая вода**

**Пищевая  
промышленность**

**Энергетика**



**Б. Е. Рябчиков**

**Современные методы  
подготовки воды  
для промышленного  
и бытового использования**

**Москва  
ДеЛи принт  
2004**

УДК 628  
ББК 38.761.1  
P98

Рецензенты:

доцент кафедры мембранной технологии РХТУ им. Д. И. Менделеева  
*А. Свитцов;*  
заведующий кафедрой ТППВ Московского государственного университета  
пищевой промышленности *С. С. Щербаков*

**Федеральная целевая программа «Культура России»  
(подпрограмма «Поддержка полиграфии и книгоиздания России»)**

**Рябчиков Б. Е.**

P98 Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования – М.: ДеЛи принт, 2004. – 328 с.

ISBN 5-94343-079-2

Проблема очистки воды, используемой для бытовых и промышленных целей, от различных загрязнений имеет огромное значение. С одной стороны, постоянно повышаются требования к качеству воды, особенно в промышленности и энергетике, а с другой – происходит прогрессирующее загрязнение водных источников, которое затрудняет работу существующих систем очистки.

В данной работе обобщены основные направления развития и современное состояние систем водоподготовки с использованием новейших технологических и аппаратурных решений в области осветления, обезжелезивания, умягчения и обессоливания воды для использования в пищевой промышленности, энергетике и для бытового применения. Основное внимание уделено современным методам обезжелезивания, ионного обмена, мембранной фильтрации и аппаратурно-технологическим схемам на их основе.

Для специалистов в области водоподготовки для пищевых производств, энергетики и бытового использования.

УДК 628  
ББК 38.761.1

ISBN 5-94343-079-2

© Рябчиков Б. Е., 2004  
© ООО «ДеЛи принт», 2004

## Введение

### Вода – основа жизни и базовое промышленное сырье

Вода является основой жизни и сырьем для огромного количества технологий во всех отраслях промышленности.

Вода – прекрасный растворитель как неорганических, так и многих органических веществ и газов, что объясняется ее сильнополяризованной структурой. Из-за этого в чистом виде она в природе не существует. Все природные воды являются растворами тех или иных веществ, с которыми вода контактировала в процессе круговорота. Эти вещества могут быть полезны или вредны для человеческого организма при использовании воды для питьевых целей или в пищевой промышленности. При использовании воды в промышленности для многих технологических процессов действуют жесткие ограничения по содержанию в ней тех или иных примесей.

Вода содержится в поверхностных или подземных источниках. Подземные воды содержат в основном природные компоненты – продукты растворения пород, с которыми контактировала вода. Состав таких вод относительно стабилен. Воды одного горизонта, отобранные в разных точках, даже отстоящих на большом расстоянии, достаточно близки по составу. При этом воды из находящихся рядом скважин, пробуренных в разные горизонты, могут различаться достаточно сильно. В поверхностных водах наряду с природной составляющей во все большем количестве присутствуют техногенные загрязнения. Поверхностные воды интенсивно загрязняются отходами сельского хозяйства, промышленности, энергетики, городскими стоками и т. п. Состав таких вод зависит от большого количества факторов: времени года, дождей, наличия притоков, режима работы промышленных, сельскохозяйственных и муниципальных предприятий и т. п. Поэтому состав вод по течению реки до и после населенных пунктов может значительно отличаться.

Состав воды по макро- и микрокомпонентам для питьевого или промышленного применения должен удовлетворять определенным нормам, которые рассмотрены ниже. Очистка воды до заданных концентраций по различным загрязнителям осуществляется многочисленными методами, которые были разработаны ранее, совершенствуются и создаются в настоящее время.

### Современное состояние технологии и оборудования для очистки воды

Уровень разработок в области теоретических основ водоподготовки и технологий очистки воды от различных загрязнений в нашей стране всегда был высоким [1–46]. При этом конструкции серийно выпускаемого оборудования, номенклатура и качество специальных реагентов, материалов и ионообменных смол безнадежно отставали от мирового уровня [1, 3, 5–8, 47–50]. Развал отечественной промышленности в начале 90-х гг. усугубил это положение. Однако в последние годы наметился прогресс, связанный, с одной стороны, с появлением на отечественном рынке по относительно доступным ценам продукции ведущих западных фирм, а с другой – с началом производства широкого спектра отечественных реагентов.

Мы коснемся новых типов технологических процессов и оборудования для водоподготовки, появившихся в нашей стране в последние годы и уже используемых в промышленности. Следует отметить, что это в основном оборудование западного производства и его отечественные аналоги.

При этом существуют два принципиально различающихся подхода.

Во-первых, появились многочисленные фирмы-посредники, поставляющие готовые установки под заказ. Разработка, изготовление, монтаж и пуско-наладочные работы установок производятся головной зарубежной фирмой, а отечественная фирма выполняет только посредническую функцию. В лучшем случае она производит монтаж и пуско-наладочные работы. Стоимость таких установок велика, а качественно-го обслуживания от таких фирм ожидать не приходится.

Другая, пока малочисленная, группа организаций располагает квалифицированным персоналом, имеющим научный и инженерный опыт, и самостоятельно ведет разработку технологии и оборудования, подбирает и закупает комплектующие у ведущих фирм, размещает заказы на изготовление различных узлов на отечественных предприятиях, производит сборку, монтаж и обслуживание оборудования.

Отличительными особенностями всех промышленных установок по сравнению с бытовыми являются как значительно большая производительность, так и несравнимо более высокие требования к качеству воды и надежности работы, т. е. бесперебойности подачи ее потребителю. Это требует квалифицированного расчета установок, выбора оптимальных типа оборудования и режимов его работы, обязательного дублирования аппаратов, а также гарантированного ресурса и надежного сервисного обслуживания.

Новыми высокотехнологичными элементами систем водоподготовки являются:

- высокоэффективные материалы для механической фильтрации и обезжелезивания;
- надежные, компактные, простые и относительно дешевые блоки управления разнообразным оборудованием водоподготовки;
- высоконадежная и коррозионностойкая арматура, в том числе многоходовые краны, часто совмещенные с блоками управления, что позволяет создавать малогабаритные автоматизированные установки;
- корпуса из полимерных материалов диаметром до 1,6 м, из оцинкованной стали – до 1,8 м, из стали с полиэтиленовым покрытием – до 3,4 м;
- высокоэффективные, надежные и легко монтируемые дренажно-распределительные устройства фильтров;
- ионообменные смолы с новыми химико-технологическими свойствами;
- реагенты для стабилизации воды в теплосетях, в т. ч. на основе комплексонов и биоцидов;
- насосы-дозаторы с возможностью программируемого ввода реагентов для автоматического поддержания заданных величин рН, окислительно-восстановительного потенциала, концентраций активного хлора и т. п.;
- обратноосмотические и нанофильтрационные мембраны нового поколения, эффективно работающие при давлении 6–16 атм.

Все эти компоненты, используемые в различных сочетаниях, позволяют на принципиально новом аппаратно-технологическом уровне достаточно просто реализовать в металле многие ранее разработанные идеи, такие как:

1. обезжелезивание и деманганация с вводом в поток воды различных окислителей и фильтрование на специальной каталитической загрузке;
2. малогабаритные автоматизированные ионообменные установки большой производительности;
3. противоточная регенерация ионитов;
4. установки микро-, ультра-, нанофильтрации и обратного осмоса большой производительности;
5. коррекция рН и стабилизация параметров воды вводом различных специальных реагентов;
6. снижение щелочности воды обработкой слабокислотным катионом;
7. снижение окисляемости воды на специальных регенерируемых анионитах;

8. придание «блеска» воде «полировкой» методом микро- или ультрафильтрации.

Сегодня имеется возможность создавать сложные установки за рекордно короткие по сравнению с прошлыми временами сроки. Так, установки небольшой производительности (5–20 м<sup>3</sup>/ч), включающие обезжелезивание, умягчение, корректировку рН и т. п., могут быть разработаны, смонтированы и запущены за 3–4 недели, а производительностью 50–100 м<sup>3</sup>/ч – за 2–6 месяцев. Установки обратного осмоса, изготавливаемые в России, как правило, разрабатываются для конкретного потребителя, что требует несколько большего времени – при производительности до 5 м<sup>3</sup>/ч – 3–6 недель, а при 200 м<sup>3</sup>/ч – 4–8 месяцев.

В связи с большим объемом и широтой охватываемого материала возможны неточности и ошибки. Автор заранее благодарен за критические отзывы и замечания, позволяющие устранить имеющиеся недочеты.

## 1. Показатели качества воды. Требования к качеству воды

### 1.1. Физико-химические показатели качества воды

Важнейшими показателями качества воды, определяющими пригодность ее при использовании для питья, в промышленности и в энергетике, являются [1–8, 51–66]:

1. содержание взвешенных веществ (прозрачность);
2. солесодержание (сухой остаток, общая минерализация);
3. концентрация водородных ионов – рН;
4. общая жесткость и ее составляющие;
5. окисляемость (содержание органических веществ);
6. общая щелочность и ее составляющие;
7. содержание коррозионно-активных газов (О<sub>2</sub> и СО<sub>2</sub>).

Кроме того, для многих процессов необходимо контролировать содержание в воде катионов натрия, анионов хлора, карбонатных, сульфатных и силикатных соединений, а также соединений железа и алюминия.

Для питьевой воды наряду с первыми 5 показателями жестко нормируется содержание ряда ионов, органических, биологических загрязнений и радионуклидов (табл. 1.1–1.4).

**Содержание взвешенных веществ** характеризует загрязненность воды твердыми макро- и микрочастицами. Количество их в литре воды обычно выражают в мг/л.

Для определения содержания в воде взвешенных веществ производят фильтрацию 1 л анализируемой воды через плотный бумажный фильтр, который затем высушивается при температуре 105–110 °С до постоянного веса. Косвенным, но более экспрессным, способом является определение содержания взвесей оптическими методами – нефелометрическим, по прозрачности (по шрифту или кресту) или мутности воды путем сравнения с эталонными образцами.

**Солесодержание воды** представляет собой сумму концентраций растворенных минеральных солей и органических веществ, выраженное в мг/л. Оно определяется по нескольким методикам, оптимальным для разных потребителей воды. Зарубежное обозначение солесодержания «ppm» – означает «частей на миллион» и численно соответствует мг/л.

**Сухой остаток** определяют выпариванием 1 л предварительно профильтрованной пробы воды и высушиванием остатка при 105–110 °С до постоянного веса. В сухой остаток не входят взвешенные вещества, растворенные в воде газы и летучие вещества. Если сухой остаток прокалить при 800 °С, вес его уменьшится и получится **прокаленный остаток**. Уменьшение веса получается вследствие сгорания органических веществ и разложения карбонатов.

Удельная электрическая проводимость (в См/см) или удельное электрическое сопротивление (в Ом/см) воды показывают суммарное содержание ионогенных примесей. Эти показатели зависят от их концентрации, температуры и степени диссоциации ионов. По проводимости можно оперативно и достаточно точно определять общее солесодержание (рис. 1.1). Так, при содержании солей до 500 мг/л существует примерно пропорциональная зависимость:  $1 \text{ мкСм/см} = 1 \text{ МОм/см} \approx 0,5 \text{ мг/л NaCl}$ .

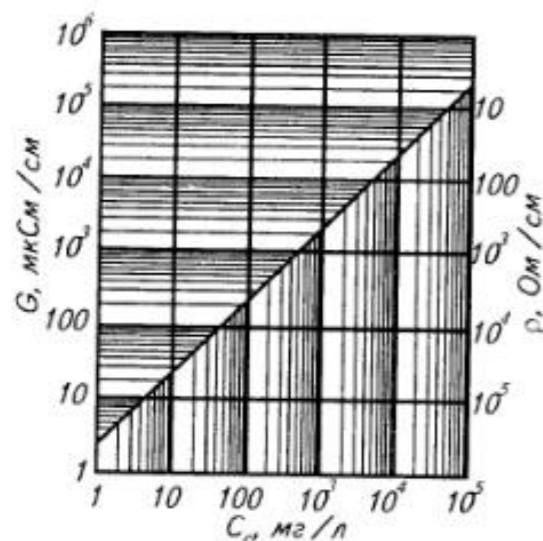


Рис. 1.1. Соотношение между проводимостью, сопротивлением и общим солесодержанием воды

что характерно для севера России, его необходимо учитывать в составе жесткости.

За рубежом используются такие единицы жесткости, как: немецкий градус Н°, французский градус t°, американский градус и ppm CaCO<sub>3</sub> (частей на миллион, равное по значению концентрации в мг/л). Соотношение этих единиц представлено ниже.

мг-экв/л	Единицы жесткости воды				
	Немецкий градус, Н°	Французский градус, t°	Американский градус	Английский градус	ppm (мг/л) CaCO <sub>3</sub>
1,000	2,804	5,005	50,05	3,51	50,05

Один немецкий градус Н° соответствует 10 мг/л СаО или 17,86 мг/л СаСО<sub>3</sub>, или 15,1 мг/л MgCO<sub>3</sub> в воде. Один французский градус t° соответствует 10 мг/л СаСО<sub>3</sub>. Один американский градус соответствует 1 мг/л СаСО<sub>3</sub>. Один английский градус = 1 гран/галлон воды, т. е. 0,0648 г СаСО<sub>3</sub>/4,546 л, что соответствует 14,29 мг/л СаСО<sub>3</sub>.

**Жесткость воды** является одним из наиболее важных показателей качества воды.

Общая жесткость воды – Ж<sub>о</sub> равна сумме концентраций в ней катионов кальция и магния и выражается в системе СИ в моль/л, однако общепринята концентрация в миллиграмм-эквивалентах на литр (мг-экв/л) при измерении больших значений жесткости и в микрограмм-эквивалентах на литр (мкг-экв/л) при измерении малых значений жесткости.

В ряде случаев, когда в природной воде присутствует в значительных количествах стронций,

Общая жесткость воды подразделяется на карбонатную и некарбонатную.

Карбонатная жесткость воды – так называемая временная жесткость – в основном обуславливается присутствием в воде бикарбонатов кальция и магния.

Некарбонатная жесткость воды – так называемая постоянная жесткость – обуславливается наличием в воде хлоридов, сульфатов и других некарбонатных солей кальция и магния.

Таким образом, общая жесткость воды равна сумме кальциевой и магниевой жесткостей, с одной стороны, и сумме карбонатной и некарбонатной жесткостей – с другой (рис. 1.2).

По величине общей жесткости природных вод в СССР и РФ принята следующая классификация: Ж<sub>о</sub> < 1,5 мг-экв/л – жесткость малая; Ж<sub>о</sub> = 1,5÷3,0 мг-экв/л – средняя; Ж<sub>о</sub> = 3,0÷6,0 мг-экв/л – повышенная; Ж<sub>о</sub> = 6,0÷12,0 мг-экв/л – высокая; Ж<sub>о</sub> > 12 мг-экв/л – очень высокая.

**Щелочностью воды** Щ<sub>о</sub> называется выраженная в мг-экв/л суммарная концентрация содержащихся в воде анионов слабых кислот и гидроксильных ионов. В зависимости от типа анионов, обуславливающих щелочность, различается гидратная, карбонатная, силикатная, гуматная и фосфатная щелочность. В большинстве природных вод концентрация бикарбонатов значительно превышает концентрацию анионов других слабых кислот, и общая щелочность Щ<sub>о</sub> совпадает с бикарбонатной.

Так как все перечисленные вещества реагируют с кислотой, то общая щелочность воды определяется количеством кислоты, затраченной на титрование с индикатором метилоранжем или фенолфталеином. Переход окраски у метилоранжа происходит при pH ≈ 4,4, а у фенолфталеина при pH ≈ 8,2. Сравнивая количество кислоты, пошедшей на титрование по метилоранжу М, с количеством кислоты, пошедшей на титрование по фенолфталеину Ф, можно определить вид щелочности (табл. 1.1).

### 1.1. Определение различных видов щелочности

Соотношение между Ф и М	В воде присутствуют ионы	Щелочность		
		Гидратная	Карбонатная	Бикарбонатная
M = Ф	ОН <sup>-</sup>	Ф(= М)	–	–
M < 2Ф	ОН <sup>-</sup> и СО <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	2Ф – М	2(М – Ф)	–
M = 2Ф	СО <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	–	М(= 2Ф)	–
M > 2Ф	СО <sub>3</sub> <sup>-2</sup> и НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	–	2Ф	М – 2Ф
Ф = 0	НСО <sub>3</sub> <sup>-</sup>	–	–	М

Состав воды может быть графически отображен, как показано на рисунке 1.2. Катионы представлены катионами щелочных (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>),

щелочноземельных металлов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) и находящимися в значительно меньших концентрациях ионами тяжелых металлов. Анионы – это прежде всего анионы угольной кислоты – карбонаты  $\text{CO}_3^{2-}$  и бикарбонаты  $\text{HCO}_3^-$ , а также анионы сильных кислот  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ . В нейтральной воде суммы концентраций катионов и анионов, выраженные в мг-экв/л, должны совпадать.

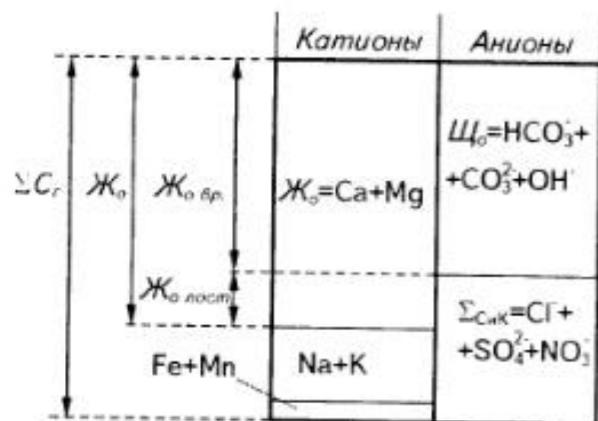


Рис. 1.2. Ионный состав воды

в воде углекислота представлена углекислым газом  $\text{CO}_2$  и его гидратированной формой  $\text{H}_2\text{CO}_3$ . С увеличением pH доля  $\text{CO}_2$  уменьшается при пропорциональном увеличении доли бикарбонат-иона  $\text{HCO}_3^-$ , и при pH 8,3 практически вся угольная кислота присутствует в виде  $\text{HCO}_3^-$ . При повышении pH до 12 она представлена только карбонат-ионами  $\text{CO}_3^{2-}$ . Существующее между различными формами угольной кислоты равновесие описывается уравнением:

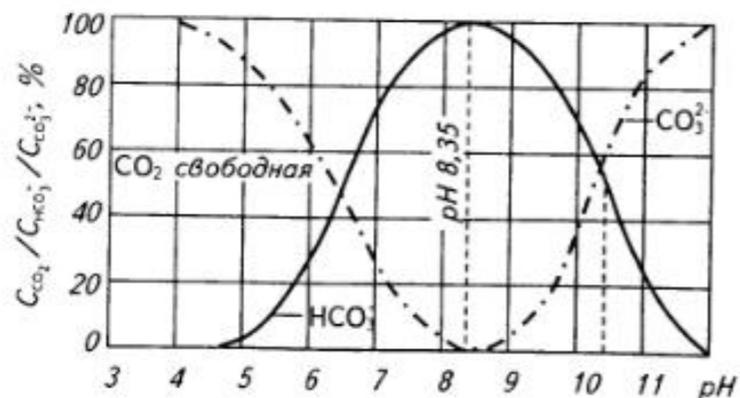
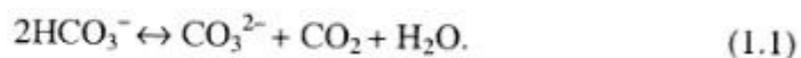


Рис. 1.3. Соотношение форм углекислоты в зависимости от pH воды (при 25 °C)

Из него следует, что для поддержания определенной концентрации  $\text{HCO}_3^-$  необходимо, чтобы в воде присутствовало эквивалентное коли-

чество свободной углекислоты. Поскольку ее растворимость зависит от температуры и парциального давления  $\text{CO}_2$  в воздухе, контактирующем с водой, то при определенных условиях содержание  $\text{CO}_2$  может отличаться от равновесного. При этом в природной воде, содержащей кроме углекислоты соли жесткости, начинаются самопроизвольные процессы восстановления равновесия, которые сопровождаются либо выделением в осадок твердой фазы, либо ее растворением.

**Стабильность воды.** Стабильной называют воду, неспособную к выделению отложений карбоната кальция и не являющуюся агрессивной, что обуславливается состоянием равновесия между растворенной в воде углекислотой и ионами кальция. Стабильность определяется индексом Ланжелье (раздел 3.5).

**Органические вещества.** Непосредственное определение концентрации органических веществ в воде затруднительно, поэтому содержание их принято характеризовать косвенным путем в мг  $\text{O}_2/\text{л}$ , определяя окисляемость воды с применением в качестве окислителя марганцево-кислого калия  $\text{KMnO}_4$  (перманганата калия) (окисляемость по Кубелю), или бихромата калия  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (ХПК – химическое потребление кислорода). Величина окисляемости выражается количеством миллиграммов  $\text{KMnO}_4$  или  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ , затраченных на окисление примесей в 1 л воды, пересчитанным на чистый кислород.

Другим показателем непрямого определения органических веществ является «общий органический углерод» (ТОС – Total Organic Carbon). Он определяется на современном приборном оборудовании и включает в себя как растворенные органические вещества, так и микробиологические объекты.

## 1.2. Требования к качеству воды

### 1.2.1. Питьевая вода

Качество воды должно удовлетворять определенным нормам, зафиксированным в отечественных ГОСТ 2874-82 (отменен), СанПиН 2.1.4.10749-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды», нормах Европейского Сообщества (ЕС) – директива «По качеству питьевой воды, предназначенной для потребления человеком» 98/83/ЕС, в международных рекомендациях Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) «Руководство по контролю качества питьевой воды» 1992 г. и в нормах Агентства по охране окружающей среды США (USEPA). При некоторых незначительных отличиях в этих требованиях только такая вода обеспечивает здоровье людей. Повышенное содержание нетоксичных солей или присутствие органических, биологических и неорганических загрязнений в количествах, превышающих указанные в данных нормах, приводит к появлению различных заболеваний [7–12, 45, 46, 53–56].

Требования к качеству питьевой воды указаны в таблице 1.2.

### 1.2. Требования к качеству питьевой воды

Показатели	СанПиН 2.1.4.1074-01				ВОЗ	USEPA	ЕС
	Единицы измерения	Нормативы (предельно допустимые концентрации) (ПДК), не более	Показатель вредности	Класс опасности			
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Обобщенные показатели</b>							
Водородный показатель	единицы рН	в пределах 6–9	–	–	–	6,5–8,5	6,5–8,5
Общая минерализация (сухой остаток)	мг/л	1000 (1500)	–	–	1000	500	1500
Жесткость общая	мг-экв/л	7,0 (10)	–	–	–	–	1,2
Окисляемость перманганатная	мг/л	5,0	–	–	–	–	5,0
Нефтепродукты, суммарно	мг/л	0,1	–	–	–	–	–
Поверхностно-активные вещества (ПАВ), анионоактивные	мг/л	0,5	–	–	–	–	–
Фенольный индекс	мг/л	0,25	–	–	–	–	–
Щелочность	мг $\text{HCO}_3^-/\text{л}$	–	–	–	–	–	30
Фенольный индекс	мг/л	0,25	–	–	–	–	–
<b>Неорганические вещества</b>							
Алюминий ( $\text{Al}^{3+}$ )	мг/л	0,5	с.-т.	2	0,2	0,2	0,2
Азот аммонийный	мг/л	2,0	с.-т.	3	1,5	–	0,5
Асбест	милл. волокон/л	–	–	–	–	7,0	–
Барий ( $\text{Ba}^{2+}$ )	мг/л	0,1	с.-т.	2	0,7	2,0	0,1
Бериллий ( $\text{Be}^{2+}$ )	мг/л	0,0002	с.-т.	1	–	0,004	–
Бор (В, суммарно)	мг/л	0,5	с.-т.	2	0,3	–	1,0
Ванадий (V)	мг/л	0,1	с.-т.	3	0,1	–	–

Продолжение таблицы 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
Висмут (Bi)	мг/л	0,1	с.-т.	2	0,1	–	–
Железо (Fe, суммарно)	мг/л	0,3 (1,0)	орг.	3	0,3	0,3	0,2
Кадмий (Cd, суммарно)	мг/л	0,001	с.-т.	2	0,003	0,005	0,005
Калий ( $\text{K}^+$ )	мг/л	–	–	–	–	–	12,0
Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ )	мг/л	–	–	–	–	–	100,0
Кобальт (Co)	мг/л	0,1	с.-т.	2	–	–	–
Кремний (Si)	мг/л	10,0	с.-т.	2	–	–	–
Магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )	мг/л	–	с.-т.	–	–	–	50,0
Марганец (Mn, суммарно)	мг/л	0,1 (0,5)	орг.	3	0,5 (0,1)	0,05	0,05
Медь (Cu, суммарно)	мг/л	1,0	орг.	3	2,0 (1,0)	1,0–1,3	2,0
Молибден (Mo, суммарно)	мг/л	0,25	с.-т.	2	0,07	–	–
Мышьяк (As, суммарно)	мг/л	0,05	с.-т.	2	0,01	0,05	0,01
Никель (Ni, суммарно)	мг/л	0,1	с.-т.	3	–	–	–
Нитраты (по $\text{NO}_3$ )	мг/л	45	с.-т.	3	50,0	44,0	50,0
Нитриты (по $\text{NO}_2$ )	мг/л	3,0	–	2	3,0	3,5	0,5
Ртуть (Hg, суммарно)	мг/л	0,0005	с.-т.	1	0,001	0,002	0,001
Свинец (Pb, суммарно)	мг/л	0,03	с.-т.	2	0,01	0,015	0,01
Селен (Se, суммарно)	мг/л	0,01	с.-т.	2	0,01	0,05	0,01
Серебро ( $\text{Ag}^+$ )	мг/л	0,05	–	2	–	0,1	0,01
Сероводород ( $\text{H}_2\text{S}$ )	мг/л	0,03	орг.	4	0,05	–	–
Стронций ( $\text{Sr}^{2+}$ )	мг/л	7,0	орг.	2	–	–	–
Сульфаты ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	мг/л	500	орг.	4	250,0	250,0	250,0
Фториды (F) для климатических районов: I и II	мг/л	1,5	с.-т.	2	1,5	2,0–4,0	1,5

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4	5	6	7	8
III	мг/л	1,2	с.-т.	2			
Хлориды (Cl <sup>-</sup> )	мг/л	350	орг.	4	250,0	250,0	250,0
Хром (Cr <sup>3+</sup> )	мг/л	0,5	с.-т.	3	–	0,1	–
Хром (Cr <sup>6+</sup> )	мг/л	0,05	с.-т.	3	0,05	(всего)	0,05
Цианиды (CN <sup>-</sup> )	мг/л	0,035	с.-т.	2	0,07	0,2	0,05
Цинк (Zn <sup>2+</sup> )	мг/л	5,0	орг.	3	3,0	5,0	5,0

с.-т. – санитарно-токсикологический

орг. – органолептический

Величина, указанная в скобках, во всех таблицах может быть установлена по указанию Главного государственного санитарного врача

Основные требования к питьевой воде состоят в том, что она должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства.

Качество питьевой воды должно соответствовать гигиеническим нормативам перед ее поступлением в распределительную сеть, а также в точках водоразбора наружной и внутренней водопроводной сети.

Безвредность питьевой воды по химическому составу определяется ее соответствием нормативам (табл. 1.2) по:

- обобщенным показателям и содержанию вредных химических веществ, наиболее часто встречающихся в природных водах на территории Российской Федерации, а также веществ антропогенного происхождения, получивших глобальное распространение;
- содержанию вредных химических веществ, поступающих и образующихся в воде в процессе ее обработки в системе водоснабжения;
- содержанию вредных химических веществ, поступающих в источники водоснабжения в результате хозяйственной деятельности человека.

Безопасность питьевой воды в эпидемическом отношении определяется ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям, представленным в табл. 1.3.

Благоприятные органолептические свойства воды определяются ее соответствием нормативам, указанным в табл. 1.4, а также нормативам содержания веществ, оказывающих влияние на органолептические свойства воды, приведенным в табл. 1.2 и 1.3.

Не допускается присутствие в питьевой воде различных невооруженным глазом водных организмов и поверхностной пленки.

Радиационная безопасность питьевой воды определяется ее соответствием нормативам по показателям общей  $\alpha$ - и  $\beta$ -активности, представленным в табл. 1.5, либо по содержанию отдельных радионуклидов в соответствии с Нормами радиационной безопасности НРБ-99 [54].

### 1.3. Требования по микробиологическим и паразитологическим показателям воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы
Термотолерантные колиформные бактерии	Число бактерий в 100 мл	Отсутствие
Общие колиформные бактерии	Число бактерий в 100 мл	Отсутствие
Общее микробное число	Число образующих колонии бактерий в 1 мл	Не более 50
Колифаги	Число бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл	Отсутствие
Споры сульфитредуцирующих клостридий	Число спор в 20 мл	Отсутствие
Цисты лямблий	Число цист в 50 л	Отсутствие

### 1.4. Требования к органолептическим свойствам воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы, не более
Запах	баллы	2
Привкус	баллы	2
Цветность	градусы	20 (35)
Мутность	ЕМФ (единицы мутности по формазину) или мг/л (по каолину)	2,6 (3,5) 1,5(2)

### 1.5. Требования по радиационной безопасности питьевой воды

Показатели	Единицы измерения	Нормативы	Показатель вредности
Общая $\alpha$ -радиоактивность	Бк/л	0,1	радиаци.
Общая $\beta$ -радиоактивность	Бк/л	1,0	–

#### 1.2.2. Вода для промышленности и энергетики

Требования к воде, используемой в различных отраслях промышленности и в конкретных производствах, существенно различаются [1, 3–6, 57–66]. Они отражены в соответствующих ГОСТах, технических условиях (ТУ), технологических инструкциях (ТИ), фармакологических статьях и других нормативных документах. Разброс требований чрезвычайно широк: от удаления только взвешенных частиц до воды, сверхчистой по всем компонентам. Содержание в ней загрязнений столь мало, что их концентрация не может быть измерена прямыми методами, а в обобщенном виде выражается в электропроводности или сопротивлении, которое часто требуется близким к теоретическому пределу – 18 МОм/см.

Все промышленные предприятия являются потребителями воды. Она расходуется для таких основных целей, как:

- хозяйственно-бытовое водоснабжение;
- отвод тепла, подогрев оборудования, кондиционирование;
- основные технологические нужды – приготовление реагентов, полупродуктов, теплоносителей, отмывка деталей.

Требования к воде для хозяйственно-бытовых целей минимальны, это, как правило, водопроводная вода. В ряде случаев допускается применение поверхностных или подземных вод без обработки, либо оборотных.

Воды 2 категории наиболее часто используются в обороте, основные требования к ним – минимальная коррозионная активность и отложения солей. Это достигается комплексом мероприятий по поддержанию в них определенного солевого состава и pH. Для этого осуществляется постоянная продувка системы, а подпиточная вода умягчается или обессоливается, в нее вводятся ингибиторы, а также щелочь или кислота для корректировки pH. Требования к качеству вод для таких целей в различных производствах достаточно близки. Расход таких вод составляет от десятков до тысяч кубометров в час.

Требования к воде для технологических нужд определены в соответствующих ГОСТах, ОСТах, ТУ, ТИ и т. п. Эти требования для различных производств очень отличаются друг от друга как по допустимому содержанию различных химических и механических загрязнений, так и по специальным требованиям, например, биологической стерильности и т. п.

В пищевой промышленности, как правило, требуется вода, по солесодержанию близкая к водопроводной, но с ограничением по содержанию взвесей, железа, марганца, солей жесткости и часто по биозагрязнениям. Наиболее распространено использование умягченной воды для производства соков, водки, пива и т. п. продуктов, а также для мытья бутылок. Ряд производств потребляет обессоленную воду с солесодержанием десятки мг/л для производства высокостабильной продукции. Причем иногда такую воду используют как основу для приготовления «стандартной» воды заданного состава. Потребление воды в пищевых производствах составляет от единиц до сотни м<sup>3</sup>/ч.

Для ряда пищевых производств вода является основным сырьем: для розлива питьевой воды – 100%, производства соков – до 90%, безалкогольных напитков – более 95%, пива – 90%, водки – 60%.

Реальное потребление воды на единицу продукции существенно выше, поскольку она используется не только непосредственно как базовое сырье, но и для вспомогательных нужд – мытья бутылок и оборудования, нагрева и охлаждения и т. п.

Требования к воде для этих производств представлены в табл. 1.6 [63–65].

### 1.6. Требования к воде для производства водки, пива и безалкогольной продукции

Показатель	Требования к воде по ТИ-10-04-03-09-88 для производства водки		Требования по ТИ 10-5031536-73-10 к воде для производства:	
	для воды с исходной жесткостью свыше 1 мг-экв/л	для воды с исходной жесткостью до 1 мг-экв/л	пива	безалкогольных напитков
pH	менее 7,8	менее 7,8	6–6,5	3–6
Cl <sup>-</sup> , мг/л	80	25	100–150	100–150
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	100	20	100–150	100–150
Mg <sup>2+</sup> , мг/л	1,3	7,0	следы	
Ca <sup>2+</sup> , мг/л	1,3	7,0	40–80	
K <sup>+</sup> + Na <sup>+</sup> , мг/л	100	15		
Щелочность, мг-экв/л	4,0	1,0	0,5–1,5	1,0
Сухой остаток, мг/л	500	100	500	500
Нитриты, мг/л			0	следы
Нитраты, мг/л	40	40	10	10
Фосфаты, мг/л	0,10	0,10		
Алюминий, мг/л	0,1	0,1	0,5	0,1
Медь, мг/л	0,1	0,1	0,5	1,0
Силикаты, мг/л	7,0	3,0	2,0	2,0
Железо, мг/л	0,13	0,10	0,1	0,2
Марганец, мг/л	0,1	0,1	0,1	0,1
Окисляемость, мг O <sub>2</sub> /л	6,0	6,0	2,0	
Жесткость, мг-экв/л	0,2	1,0	≤4	0,7
Мутность, мг/л	1,5	1,5	1,0	1,0
Цветность, град	0	0	10	10

В энергетике требования зависят от используемого оборудования и режима его работы и колеблются от простого удаления взвесей и солей жесткости для теплосетей и паровых котельных до глубокого обессоливания с удалением органических загрязнений и растворенных газов (ТЭС, АЭС). Производительность установок составляет от единиц до тысяч м<sup>3</sup>/ч.

Наиболее высокие требования предъявляются к воде для производства медицинских препаратов и электронных компонентов. Кроме глубокого обессоливания, вода не должна содержать микровзвесей и бактерий. Производительность таких установок составляет от литров до десятка кубометров в час.

В качестве примеров по требованиям к воде, используемой для технологических процессов в промышленности, приведены данные по

водам для подпитки теплосетей, для электростанций с котлами низкого, среднего и высокого давления [3, 6, 58–62] (табл. 1.7), для гальванического производства (табл. 1.8), для электронной техники (табл. 1.9).

### 1.7. Показатели качества питательной воды

#### А. Питательная вода для систем теплоснабжения

Показатель	Система теплоснабжения					
	открытая			закрытая		
	температура сетевой воды, °С					
	115	150	200	115	150	200
Прозрачность по шрифту, см, не менее	40	40	40	30	30	30
Карбонатная жесткость, мкг-экв/кг						
при pH не более 8,5	800/700	750/600	375/300	800/700	750/600	375/300
при pH 8,5	не допускается			по расчету по ОСТ 108.030.47-81		
Содержание растворенного кислорода, мкг/кг	50	30	20	50	30	20
Содержание соединений железа, мкг/кг	300	300/250	250/200	600/500	500/400	375/300
Значение pH при 25 °С	от 7,0 до 8,5			от 7,0 до 11,0		
Содержание нефтепродуктов, мг/кг	1,0					

В числителе указаны значения для котлов на твердом топливе, а в знаменателе – на жидком и газообразном топливе

#### Б. Паровые газотрубные котлы

Показатель	Котлы, работающие	
	на жидком топливе	на других видах топлива
Прозрачность по шрифту, см, не менее	40	20
Общая жесткость, мкг-экв/кг	30	100
Содержание растворенного кислорода, мкг/кг	50	100

#### В. Паровые и энерготехнологические котлы и котлы-утилизаторы

Показатель	Рабочее давление, МПа (атм.)				
	0,9 (9)	1,4 (14)	1,8 (18)	4 (40)	5 (50)
	Температура греющего газа, °С				
	до 1200 включительно	до 1200 включительно	свыше 1200	до 1200 включительно	свыше 1200
1	2	3	4	5	6
Прозрачность по шрифту, см, не менее	30/20	40/30	40		

#### Продолжение таблицы 1.7.

1	2	3	4	5	6
Общая жесткость, мкг-экв/кг	40/70	20/50	15	10	5
Содержание, мкг/кг:					
соединений железа	не нормируются		150	100	50
растворенного кислорода, для					
а) котлов с чугунным экономайзером	150	100	50	50	30
б) со стальным экономайзером	50	30	30	30	20
Значение pH при 25 °С	не менее 8,5				
Содержание нефтепродуктов, мг/кг	5	3	2	1	0,3

#### 1.8. Требования к воде для гальванических производств по ГОСТ 9.314-90

№ п/п	Показатель	Норма для категории		
		1	2	3
1	Водородный показатель, единицы pH	6,0–9,0	6,5–8,5	5,4–6,6
2	Общая минерализация (сухой остаток), мг/л, не более	1000	400	5,0
3	Жесткость общая, мг-экв/л	7,0	6,0	0,35
4	Мутность по стандартной шкале, мг/л, не более	2,0	1,5	–
5	Сульфаты, мг/л, не более	500	50	0,5
6	Хлориды, мг/л, не более	350	35	0,02
7	Нитраты, мг/л, не более	45	15	0,2
8	Фосфаты, мг/л, не более	30	3,5	1,0
9	Аммиак, мг/л, не более	10	5,0	0,02
10	Нефтепродукты, суммарно, мг/л, не более	0,5	0,3	–
11	Химическое потребление кислорода, мг/л, не более	150	50	–
12	Остаточный хлор, мг/л, не более	1,7	1,7	–
13	Поверхностно-активные вещества (ПАВ), мг/л, не более	5,0	1,0	–
14	Ионы тяжелых металлов, мг/л, не более,	15	5,0	0,4
	в том числе:			
	железо (Fe, суммарно)	0,3	0,1	0,05
	медь (Cu, суммарно)	1,0	0,3	0,05
	никель (Ni, суммарно)	5,0	1,0	–
	цинк (Zn <sup>2+</sup> )	5,0	1,5	0,2
	хром (Cr <sup>2+</sup> )	5,0	0,5	–
15	Удельная электропроводность, мкСм/см	20	10	5,0

**1.9. Качество воды для электронной техники по ОСТ 11.029.003-80 и нормам Американской электронной промышленности**

Параметры воды	Марка воды по ОСТ 11.029.003-80			Марка воды по нормам ASTM D-5127-90			
	А	Б	В	Е-1	Е-2	Е-3	Е-4
Удельное сопротивление при температуре 20 °С, МОм/см	18	10	1	18	17,5	12	0,5
Содержание органических веществ (окисляемость), мг O <sub>2</sub> /л, не более	1,0	1,0	1,5				
Общий органический углерод, мкг/л, не более				25	50	300	1000
Содержание кремниевой кислоты (в пересчете на SiO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> ), мг/л, не более	0,01	0,05	0,2	0,005	0,01	0,05	1,0
Содержание железа, мг/л, не более	0,015	0,02	0,03				
Содержание меди, мг/л, не более	0,005	0,005	0,005	0,001	0,001	0,002	0,5
Содержание микрочастиц с размером 1–5 мкм, шт/л, не более	20	50	не регламент.				
Содержание микроорганизмов, колоний/мл, не более	2	8	не регламент.	0,001	0,01	10	100
Хлориды, мкг/л, не более				1	1	10	1000
Никель, мкг/л, не более				0,1	1	2	500
Нитраты, мг/л, не более				1	1	5	500
Фосфаты, мг/л, не более				1	1	5	500
Сульфат, мг/л, не более				1	1	5	500
Калий, мкг/л, не более				2	2	5	500
Натрий, мкг/л, не более				0,5	1	5	500
Цинк, мкг/л, не более				0,5	1	5	500

**2. Примеси в природной воде. Методы удаления загрязнений из раствора. Основные процессы и их аппаратное оформление**

Все примеси, загрязняющие природную воду в результате ее кругооборота, различаются по своей природе (неорганические, органические, биологические) и размерам (по степени дисперсности). На рисунке 2.1 показан весь спектр размеров частиц, которые могут присутствовать в воде, а также методы удаления этих примесей.

Условно эти примеси можно разделить на несколько групп:

1. Крупные частицы – макрочастицы, которые видны невооруженным глазом в виде мутности и имеют размер от нескольких микрометров (мкм) до 1 мм. Эти неорганические частицы гетерогенны. Они имеют четкую границу раздела с водой и могут самопроизвольно осаждаться.
2. Микрочастицы, которые видны в оптический микроскоп, а невооруженным глазом могут быть определены как опалесценция. Их размер составляет от долей до нескольких микрометров. Они имеют неорганическую или биологическую природу. Из-за броуновского движения такие частицы самопроизвольно не осаждаются.
3. Частицы, имеющие размер от сотых долей до нескольких мкм, представляют собой в основном крупные макромолекулы растворимых органических веществ с молекулярной массой до 500000 дальтон, а также вирусы и бактерии.
4. Еще меньшими размерами – в сотые и тысячные доли мкм – обладают молекулы органических и неорганических веществ с молекулярной массой до 1000–50000 дальтон, а также некоторые вирусы.
5. Истинные растворы содержат ионы растворенных неорганических веществ, которые обладают наименьшими размерами, составляющими несколько ангстрем ( $1 \text{ \AA} = 10^{-4} \text{ мкм}$ ).

Для удаления каждого из указанных видов примесей может быть использовано несколько методов. Они основываются на физических, химических, физико-химических процессах. Реально любой из способов очистки сочетает в себе несколько процессов и представляет собой комплекс воздействий на среду на макро- и микроуровнях.

Как указывалось выше, макрочастицы могут самопроизвольно осаждаться. Поэтому как один из вариантов их удаления может использоваться метод осаждения. Однако он малопродуктивен и практически не применяется. Ускорение процесса осаждения достигается путем

агрегатирования частиц при добавлении в воду специальных реагентов, т. е. методами флокуляции или коагуляции (раздел 2.2.2). Достаточно легко такие частицы отфильтровываются на сетках, гранулированных загрузках, различных пористых перегородках (разделы 2.1.2, 2.1.3).

Микрочастицы самопроизвольно не осаждаются. Для осаждения их необходимо укрупнить, что выполняется методами флокуляции или коагуляции. Они также могут извлекаться из раствора микрофильтрацией (раздел 2.1.3.1) на различных пористых материалах. При порах меньших, чем размер бактерий, последние удаляются и раствор стерилизуется.

Крупные макромолекулы также могут быть удалены методами флокуляции или коагуляции. Они извлекаются из раствора методами микро- и ультрафильтрации (раздел 2.1.3.1) на специальных мембранах с размером пор меньшим, чем у извлекаемых частиц.

Микрочастицы с молекулярной массой до 1000–50000 дальтон, а также бактерии эффективно извлекаются из раствора ультрафильтрацией.

Молекулы органических соединений с различной молекулярной массой могут удаляться сорбцией на высокопористых сорбентах или специальных анионитах-органопоглотителях (раздел 2.3.1).

Ионы растворенных неорганических веществ могут извлекаться комплексно или селективно реагентным методом, фильтрацией – микрофильтрацией и обратным осмосом (разделы 3.4.3, 3.5.3) – или ионным обменом (разделы 3.4.2, 3.5.2).

Органические и биологические загрязнения могут быть разрушены или уничтожены сильными окислителями (раздел 2.2.1).

Биологические загрязнения инактивируются физическими воздействиями, такими как ультразвук, электрические разряды, ультрафиолетовое облучение (разделы 2.1.4, 3.7).

Рассмотрим основные методы удаления примесей из раствора.

## 2.1. Физические методы очистки

К физическим методам очистки относятся такие, при которых не происходит химических превращений в растворе, не добавляются новые реагенты. К таким методам относятся отстаивание твердых частиц, фильтрация раствора через пористые перегородки, воздействие на раствор различных излучений, электрических и магнитных полей.

В воде содержатся загрязнения различной природы, размеров и состояний в растворе (рис. 2.1). Многие из них могут быть удалены физическими методами, основанными на размере частиц и их плотности (табл. 2.1).

### 2.1. Ориентировочные размеры загрязнений и методы их извлечения

Размер частиц, мкм	Молекулярная масса	Состояние загрязнений	Метод удаления	Рабочее давление, МПа	Способ фильтрации
1.0–100	–	Твердые макро-частицы. Механические взвеси	Механическая фильтрация. Макрофильтрация	0.01–0.05	Насыпные фильтры, сетки, мембраны
0.1–1.0	> 500000	Микровзвеси, коллоиды, бактерии	Микрофильтрация	0.03–0.2	Мембраны
0.1–0.01	10000–500000	Макромолекулы, коллоиды, бактерии, вирусы	Ультрафильтрация	0.07–0.7	Мембраны
0.01–0.001	100–10000	Многозарядные ионы, молекулы, вирусы	Нанофильтрация	0.3–1.6	Мембраны
0.001–0.0001	< 100	Ионы солей	Обратный осмос	0.3–7.0	Мембраны

Так, в воде обычно содержатся механические примеси разных размеров. Это могут быть мелкий песок, глинистые, иловые взвеси, частицы гидроокисей тяжелых металлов и окарины и т. п.

Наличие таких загрязнений ухудшает качество питьевой воды, вызывает сбой в работе запорной арматуры и насосов и не приемлемо для большинства технологических процессов. Поэтому первой задачей в очистке воды является удаление этих механических загрязнений (взвешенных частиц) – осветление. Они могут быть удалены методами отстаивания и фильтрации через насыпные фильтры, сетки и крупнопористые мембраны.

Удаление более мелких частиц может производиться путем фильтрации через различные материалы. Фильтрация – процесс пропускания загрязненного раствора через пористую среду с определенными размерами пор, при котором происходит отделение частиц с размерами большими, чем размер пор, от фильтрата, который содержит частицы с размерами меньшими, чем поры.

В реальных процессах, например, при фильтрации твердых частиц, тонкость фильтрации выше, чем первоначальный геометрический размер пор, из-за их забивания и уменьшения проходного сечения.

Фильтрация процесс не селективный – задерживаются все загрязнения с размером большим, чем поры.

Можно выделить два принципиально различных по способу организации процессов очистки и регенерации типа фильтрации:

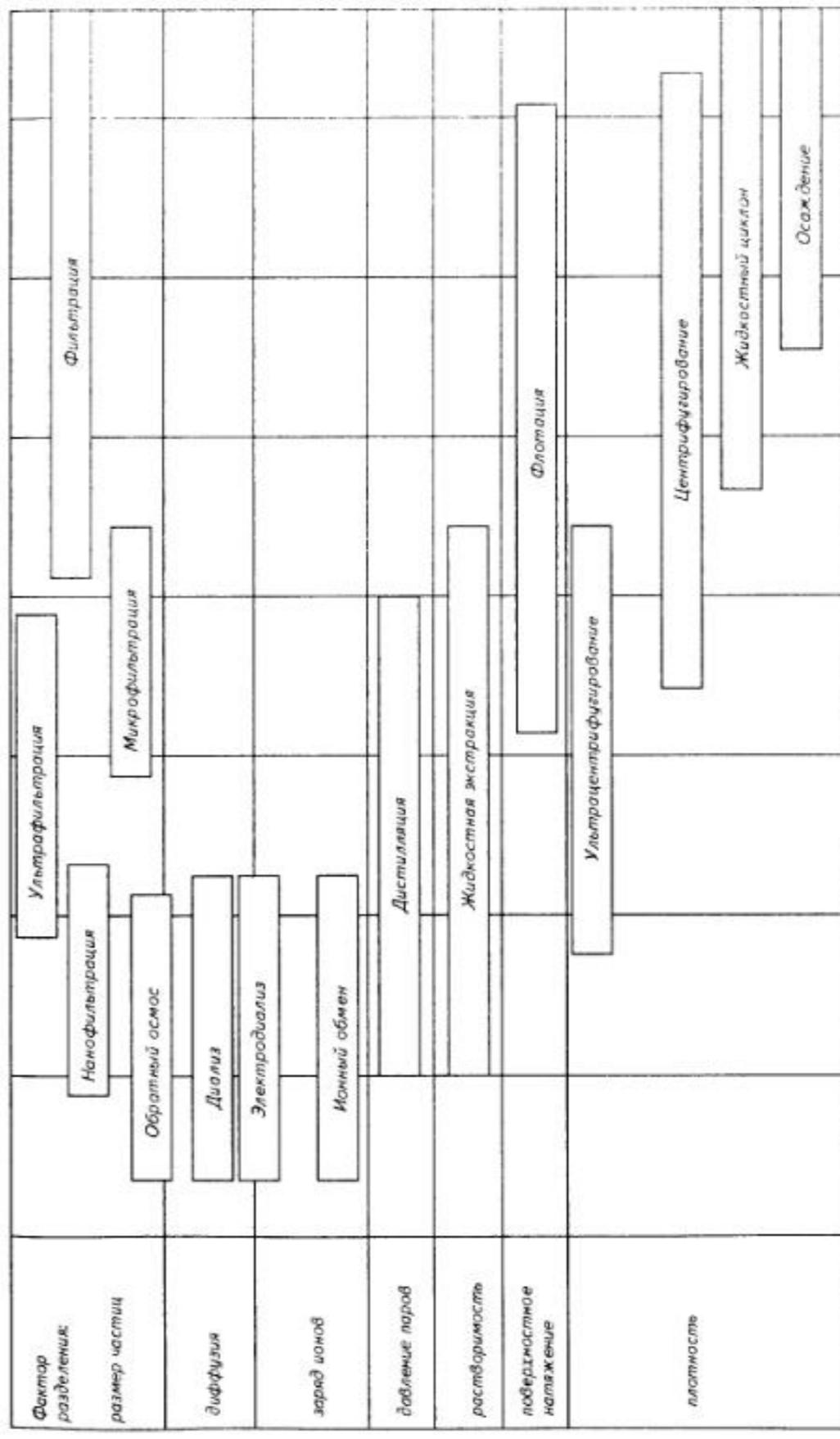
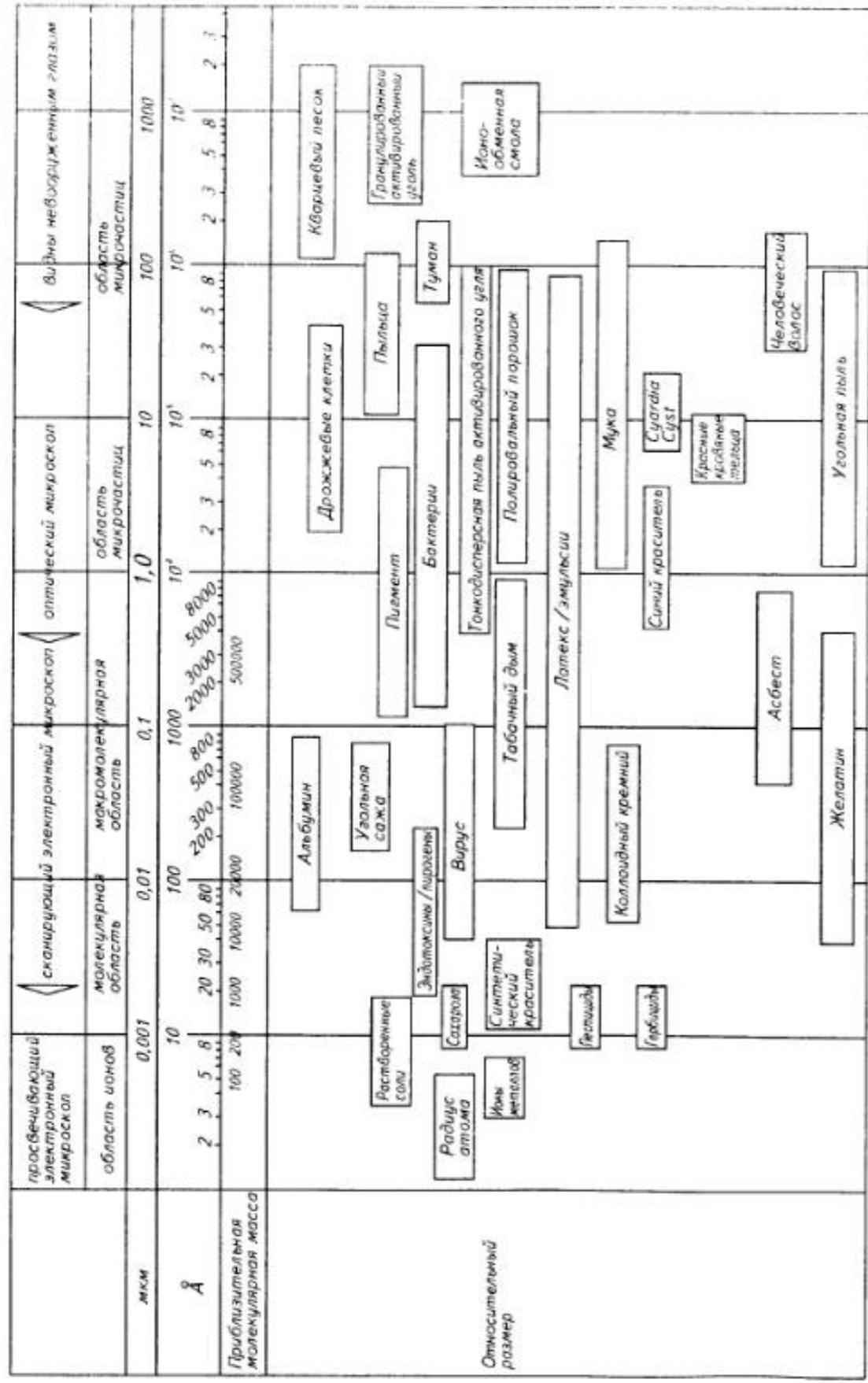


Рис. 2.1. Спектр размеров частиц, которые могут присутствовать в воде, и методы их удаления

- фильтрация через насыпной слой гранулированной загрузки;
- фильтрация через специально сформированную жесткую перегородку-мембрану.

Мембранные процессы включают в себя следующие близкие по физической сущности и методам осуществления виды:

- макрофильтрация;
- микрофильтрация;
- ультрафильтрация;
- нанофильтрация;
- обратный осмос.

Рассмотрим эти методы.

### 2.1.1. Отстаивание

Крупные частицы – макрочастицы, которые видны невооруженным глазом в виде мутности и имеют размер от единиц микрометров (мкм) до песчинок с размером от долей до 1 мм, могут самопроизвольно оседать. Поэтому как один из вариантов их удаления может использоваться метод отстаивания. Этот способ малопродуктивен и в чистом виде в промышленности не используется. Он может применяться в быту при высокой мутности воды и малом водопотреблении.

### 2.1.2. Фильтрация через зернистые загрузки

#### 2.1.2.1. Насыпные фильтры периодического действия

Механические загрязнения (взвеси) из больших потоков воды, как правило, удаляются в насыпных осветлительных фильтрах с гранулированной загрузкой (механических фильтрах) периодического действия [1–8, 14, 15, 47–50, 67–75].

Механический насыпной напорный фильтр представляет собой (рис. 2.2) вертикальный корпус из металла или пластика 3 с дренажно-распределительными системами 2, 5, 7, заполненный гранулированной загрузкой 4; как правило, это кварцевый песок, гидроантрацит и т. п. Для улучшения распределения раствора по сечению и уменьшения забивания отверстий нижнего дренажного устройства оно помещается в слой гравия 6.

Фильтрация загрязненной воды производится сверху вниз (рис. 2.2, а). При этом крупные частицы задерживаются в порах между гранулами загрузки, а мелкие загрязнения – за счет различных эффектов, прежде всего электростатического, прилипают к частицам загрузки. Чем больше загрязнений задержано слоем загрузки, тем уже остаются проходы для жидкости и тем выше глубина очистки воды. Основная масса загрязнений собирается в верхней части слоя загрузки.

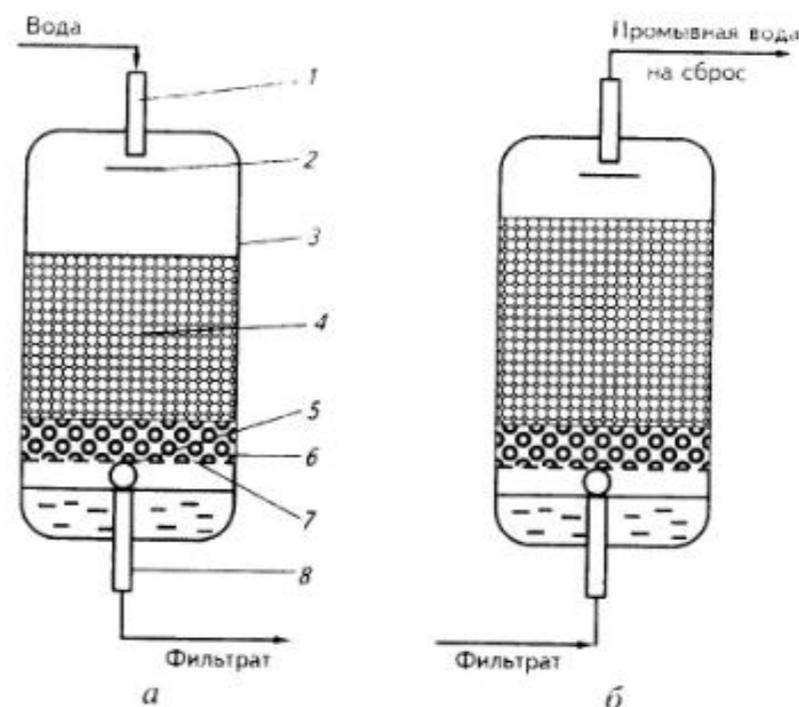


Рис. 2.2. Фильтр механической очистки с гранулированной загрузкой периодического действия в рабочем режиме (а) и при регенерации (б):

1, 8 – патрубков; 2 – распределитель жидкости; 3 – корпус; 4 – загрузка; 5 – центральный коллектор; 6 – гравий; 7 – перфорированные лучи

Правильно сконструированный фильтр при верно подобранных гранулометрическом составе загрузки и скорости подачи жидкости работает практически всем объемом загрузки. Фронт загрязнений постепенно опускается вниз по слою загрузки. При слишком высокой скорости воды резко снижается эффективность фильтрации, а при слишком малой загрязнения собираются только в верхнем слое загрузки.

Наиболее эффективны и экономичны многослойные фильтры, в которых для увеличения грязеемкости слоя и эффективности фильтрации его составляют из материалов с различной плотностью и крупностью частиц так, чтобы сверху слоя были крупные легкие, а внизу мелкие тяжелые частицы. В этом случае крупные загрязнения задерживаются в верхнем слое, а оставшиеся мелкие – в нижнем слое, т. е. работает весь объем загрузки. Размеры и плотность частиц подбираются так, чтобы их скорость псевдооживления была близка. Тогда при регенерации обратной промывкой (взрыхлении) «кипит» весь слой (рис. 2.2, б).

Следует отметить, что скорость фильтрации в механических фильтрах незначительно зависит от применяемого материала. Эта скорость для разных материалов с оптимальным гранулометрическим составом составляет 2–5 м/ч для безнапорных и 8–12 м/ч для напорных

фильтров. Она рассчитана теоретически, подтверждена многолетним опытом эксплуатации и рекомендуется как зарубежными, так и отечественными производителями загрузки [1, 5, 8, 40, 48–50, 71]. Превышение скорости приводит к ухудшению качества очистки!

На засыпных фильтрах удаляются частицы с размером более 10–20 мкм. Для очистки от частиц меньших размеров их необходимо укрупнить, агрегатировать, что достигается химическими методами флокуляцией или коагуляцией (см. ниже). Другим вариантом очистки от таких частиц является мембранная фильтрация.

В определенный момент слой загрязняется настолько, что сопротивление фильтрации резко возрастает, а производительность падает. Повышение давления воды может привести к «пробою», т. е. к выносу грязи в чистую воду. Работу фильтра прекращают и слой загрузки регенерируют.

Регенерация зернистой загрузки (взрыхление) заключается в ее отмывке водой снизу вверх с такой скоростью, при которой происходит псевдооживление загрузки и ее расширение на 30–50%. В таком режиме частицы как бы кипят; из межпорового пространства удаляются задержанные взвеси, а при соударении частиц с их поверхности удаляются лишние загрязнения.

Регенерацию (рис. 2.2, б) проводят либо исходным раствором, либо осветленной водой из буферной емкости. Последнее более предпочтительно, особенно в крупных установках, поскольку позволяет создать необходимый расход воды при колебаниях давления в водопроводе. Первый вариант широко используется в бытовых и иногда в промышленных фильтрах, если гарантируется необходимый расход и давление воды в подающем водопроводе.

После окончания взрыхления слою загрузки дают осесть, и затем начинается фильтрация. Первые объемы отфильтрованной воды, содержащие избыточное количество загрязнений, сбрасывают в канализацию, это называют «санитарной промывкой».

Серийные отечественные осветлительные фильтры серии ФОВ производятся Таганрогским котельным заводом «Красный котельщик» (ТКЗ) и Бийским котельным заводом (БиКЗ) много десятилетий [49–50]. Их параметры сведены в таблицу 2.2. Типичная конструкция такого фильтра представлена на рисунке 2.3. В комплект поставки отдельно входят корпус и дренажная система. Могут поставляться трубопроводы внешней обвязки и запорная арматура. После монтажа корпуса фильтра проводится антикоррозионная обработка, установка нижнего дренажного устройства и заливка под него бетона. Все эти работы выполняются потребителем самостоятельно или с привлечением монтажной организации.

## 2.2. Основные параметры осветлительных фильтров ТКЗ и БиКЗ

Обозначение	Произв.-лте.п.	Диаметр, мм	Высота, мм	Масса, кг	Производительность, м <sup>3</sup> /ч
ФОВ-1.0-0.6-1	БиКЗ	1000	2675	666	12
ФОВ-1.4-0.6-2	БиКЗ	1400	2475	1001	16
ФОВ-1.0-0.6-1	ТКЗ	1000	2780	982	10
ФОВ-1.5-0.6-ВНФР	ТКЗ	1500	2900	1520	20
ФОВ-2.0-0.6-ВНФР	ТКЗ	2000	3430	2140	30
ФОВ-2.6-0.6-ВНФР	ТКЗ	2600	3740	3278	50
ФОВ-3.0-0.6-ВНФР	ТКЗ	3000	4080	4558	70
ФОВ-3.4-0.6-ВНФР	ТКЗ	3400	4270	5440	90
ФОВ-2К-3.4-0.6-ВНФР	ТКЗ	3400	5500	10990	180
ФОВ-2К-3.4-0.6-ВНФР	ТКЗ	3400	7080	13943	270

Все фильтры рассчитаны на давление 0,6 МПа и температуру до 40 °С.

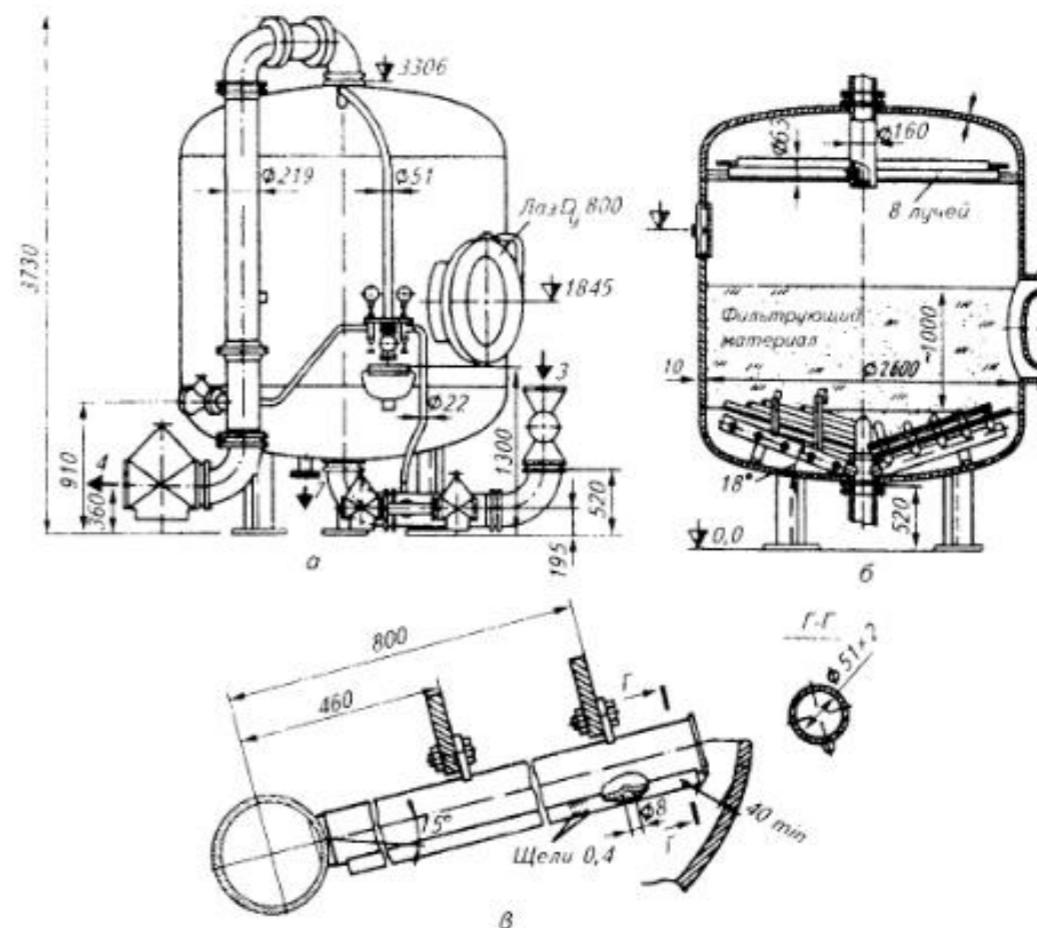


Рис. 2.3. Стандартный осветлительный фильтр ФОВ-2.6-06 с лучевым дренажем:

а – внешний вид; б – разрез; в – нижнее дренажное устройство типа «копирующее дно»

В современном варианте фильтр имеет корпус из оцинкованной, гуммированной или нержавеющей стали, или же из пластика. Последний представляет собой внутренний корпус (лейнер) из пищевого полиэтилена, укрепленный сверху стеклопластиковой оболочкой либо отлитый из специального пищевого стеклопластика. Внутри корпуса располагаются нижняя и верхняя дренажно-распределительные системы низкого сопротивления, выполненные из пластмассы (АБС, полипропилен, ПВХ) (рис. 2.4). Для улучшения распределения раствора по сечению и уменьшения забивания отверстий дренажа, нижнее дренажное устройство засыпается слоем специально подобранного окатанного гравия с заданным гранулометрическим составом.

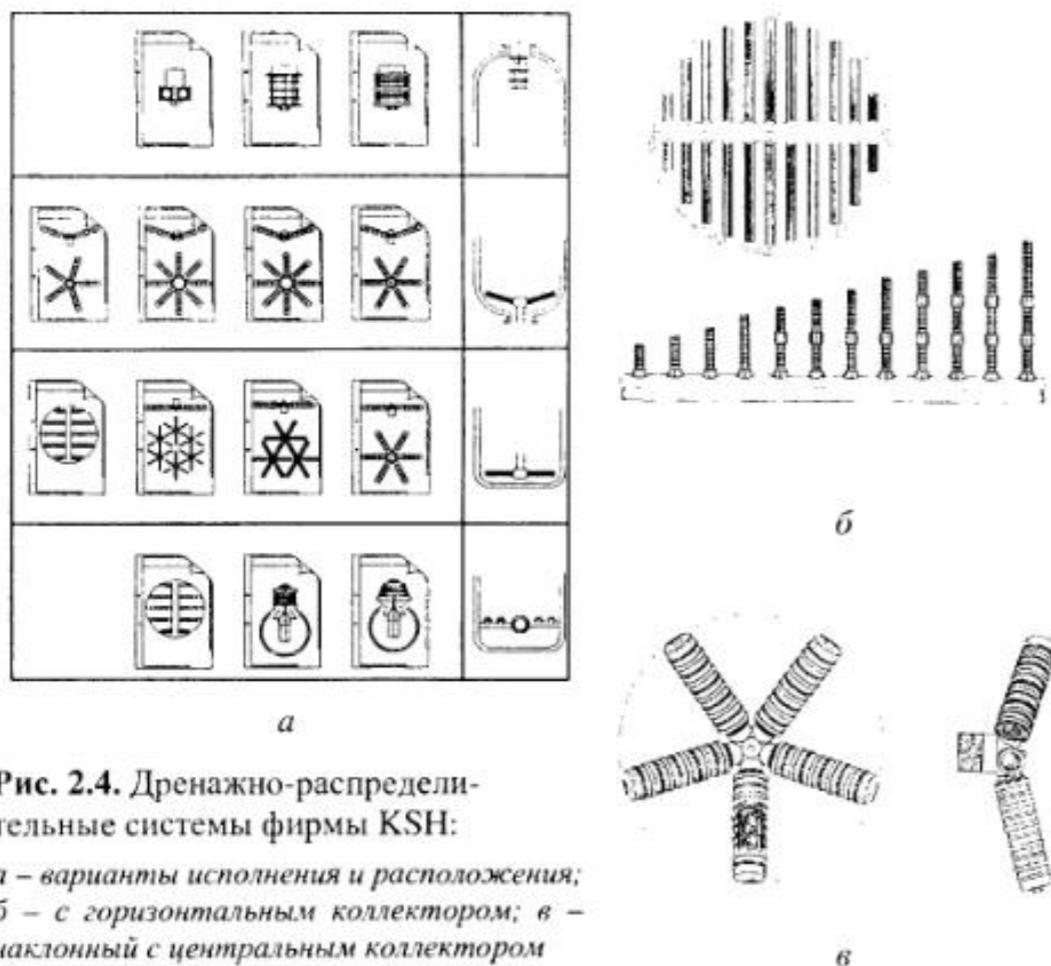


Рис. 2.4. Дренажно-распределительные системы фирмы KSH:

а – варианты исполнения и расположения;  
б – с горизонтальным коллектором; в – наклонный с центральным коллектором

Основными производителями корпусов фильтров за рубежом являются фирмы: из пластика – Structural, Purk и Pevasa, из оцинкованной стали – Logivan. Первые две предлагают корпуса близкого типоряда по размерам в дюймовой системе, Structural из полиэтилена с упрочняющей обмоткой стеклопластиком, а Pevasa – из литого стеклопластика. Характеристики корпусов фирмы Structural представлены в таблице 2.3

[73], а фирмы Logivan, производящей металлические корпуса с размерами в метрической системе, – в таблице 2.4 [74].

### 2.3. Размеры и объем стандартных корпусов из композитных пластиков фирмы Structural

Тип*	Размер, мм		Масса, кг	Объем, л
	диаметр	высота		
817	213	478	1.5	18.1
844	213	1028	3.4	32.9
1035	259	890	4.2	38.6
1054	259	1380	6.2	49.6
1252	305	1344	7.8	84
1354	333	1387	9.9	104.3
1465	356	1641	18.5	154
1665	409	1641	20.0	185
1865	469	1787	32.0	250
2160	548	1630	32.0	310
2469	625	1880	41.0	450
3072	785	2040	84	710
3672	942	2110	99	1020
4278	1054	2430	133	1360
4882	1219	2465	178	1840
63123	1623	3680		5255

\*Тип – диаметр и высота корпуса в дюймах

В качестве дренажных устройств в серийных отечественных фильтрах Таганрогского и Бийского котельных заводов применяются лучевые дренажи высокого сопротивления (рис. 2.3, в). Они представляют собой расположенный горизонтально (рис. 2.2) или наклонно (рис. 2.3) центральный коллектор, к которому присоединены боковые лучи. Каждый луч имеет отверстия, которые закрыты перфорированной нержавеющей пластиной. При горизонтальном расположении коллектора пространство между лучами и дном фильтра заполняется химически стойким бетоном, а отверстия смотрят вверх. В варианте «копирующее дно» (рис. 2.3) отверстия смотрят вниз. Такие системы обладают относительно низким проходным сечением и ограниченной производительностью. Использование металла приводит к его коррозионным разрушениям, особенно когда комбинируются элементы из нержавеющей и углеродистой сталей.

При реконструкции фильтров иногда такие системы заменяют на коллекторы с пластмассовыми (ВТИ-К) или керамическими (ВТИ) колпачками [1, 3, 6–8]. Сами коллекторы часто выполняют из полиэтилена или поливинилхлорида.

#### 2.4. Размеры и объем стандартных корпусов из оцинкованной стали фирмы Logivan

Диаметр корпуса, мм	Высота, мм	Объем, л	Масса, кг
400	1700	200	39
500	1800	320	58
650	1795	520	90
700	1915	650	114
750	2100	760	138
800	2155	975	150
900	2570	1300	260
1000	2685	1650	298
1100	2720	2000	358
1250	2970	2800	422
1300	2990	2900	515
1400	3020	3400	670
1500	3060	3950	780
1600	3115	4240	950
1800	3195	5900	1140

Отечественные разработчики предлагают многочисленные новые разработки дренажных устройств. Фирмы «Экополимер» и НПП «Экспресс-Эко» разработали дренажные устройства из пенополиэтилена с высокой пористостью (рис. 2.5, а) и, соответственно, производительностью. Рекламируется, что вследствие малого размера отверстий такие устройства полностью предотвращают унос загрузки. Однако вызывает сомнение возможность их длительной работы, поскольку эти малые отверстия могут необратимо забиваться взвесью, особенно изнутри при обратной промывке.

Фирма «Черн» разработала конструкцию дренажных лучей из полиэтиленовой или нержавеющей стальной трубы с отверстиями в верхней части, которые закрываются перфорированной полосой из нержавеющей стали с оригинально расположенными прорезями большего, чем у стандартных лучей, проходного сечения. Данное устройство может быть рекомендовано для крупногабаритных фильтров. Его основной недостаток – высокая цена.

ПП «Тэко-Фильтр» предлагает оригинальные колпачки из нержавеющей стали с существенно большей, чем у колпачков типа ВТИ, рабочей площадью и производительностью [72]. Колпачки изготавливаются двух типоразмеров с диаметром 74 и 100 мм; в двух исполнениях, с верхним и нижним расположением сетки; с размерами щелей 0,2 и 0,4 мм. Их недостаток – высокая цена (рис. 2.5, б).

НПО «Техномаш» разработал колпачки из нержавеющей стали с использованием нержавеющей сетки. Их надежность вызывает сомнение из-за возможности разрыва сетки.

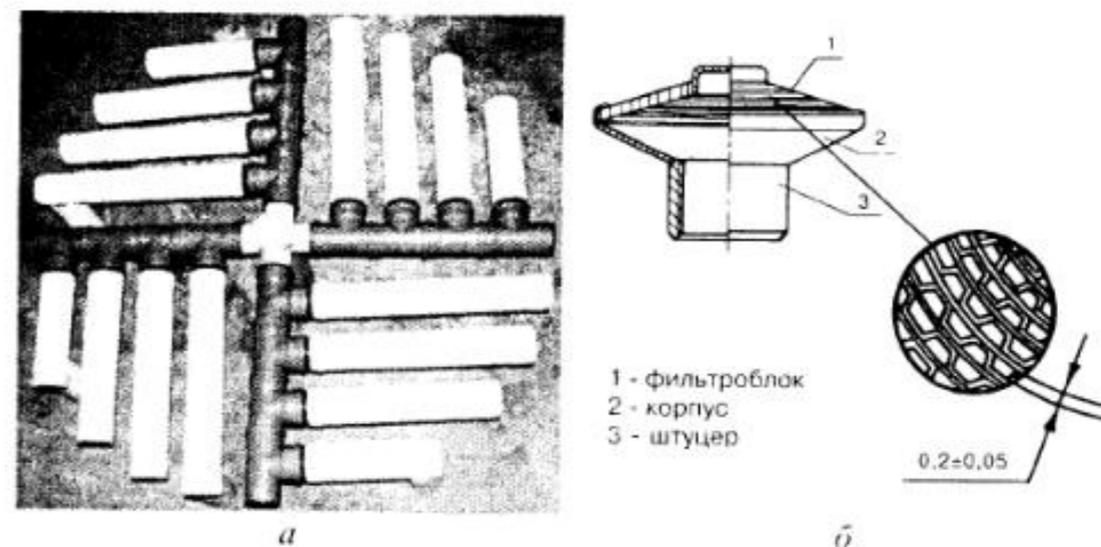


Рис. 2.5. Отечественные дренажные системы для фильтров:  
а – система Экополимер; б – колпачки и сборный дренаж ТЭКО-ФИЛЬТР

Один из крупнейших мировых производителей дренажных устройств – фирма «KSH» – предлагает широчайшую номенклатуру как колпачков различного размера, так и лучевых дренажей практически любой длины и диаметра. Такие устройства применяются многими зарубежными и отечественными организациями для фильтров с диаметром от 100 до 3400 мм (рис. 2.6).

Современные фильтры снабжаются блоком автоматического управления, который представляет собой электронный или механический таймер, включающий через определенное время (1 раз в сутки или через заданное число суток) программу регенерации. Как правило, регенерация производится в ночное время, когда потребление воды минимально. Программа регенерации включает в себя выполнение операций взрыхления, осаждения загрузки и санитарную промывку. Промывные воды сбрасываются в канализацию. Продолжительность всех операций устанавливается при наладке фильтра, а потребитель имеет возможность корректировать их при изменении качества воды и износе загрузки. Сигнал от датчика программы регенерации поступает либо на двигатель многоходового гидроклапана, производящего переключения всех потоков в фильтре (рис. 2.6, а), либо на отдельные гидро- или пневмоклапаны, установленные на трубопроводах обвязки фильтра (рис. 2.6, б). Блоки управления фильтров с производительностью до 10–15 м<sup>3</sup>/ч выполняются в виде моноблока, устанавливаемого непосредственно на

фильтр или сбоку от него. В первом случае такой блок управления вворачивается в специальное стандартное отверстие в корпусе, и к нему подводятся все трубопроводы (рис. 2.6. а). Труба, соединяющая нижний дренаж с блоком управления, проходит внутри фильтра, а верхний дренаж непосредственно закрепляется на блоке управления. При расположении блока управления рядом с корпусом к нему кроме трубопроводов подачи и вывода раствора подключаются две линии, соединяющие его с верхним и нижним дренажами.

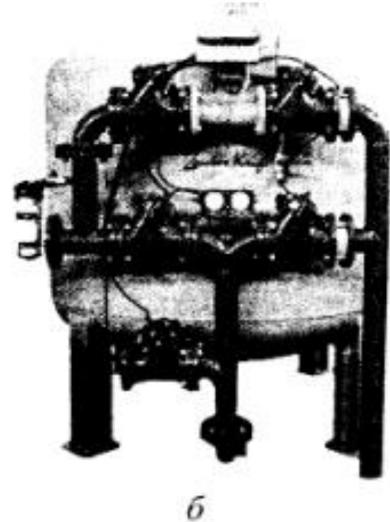
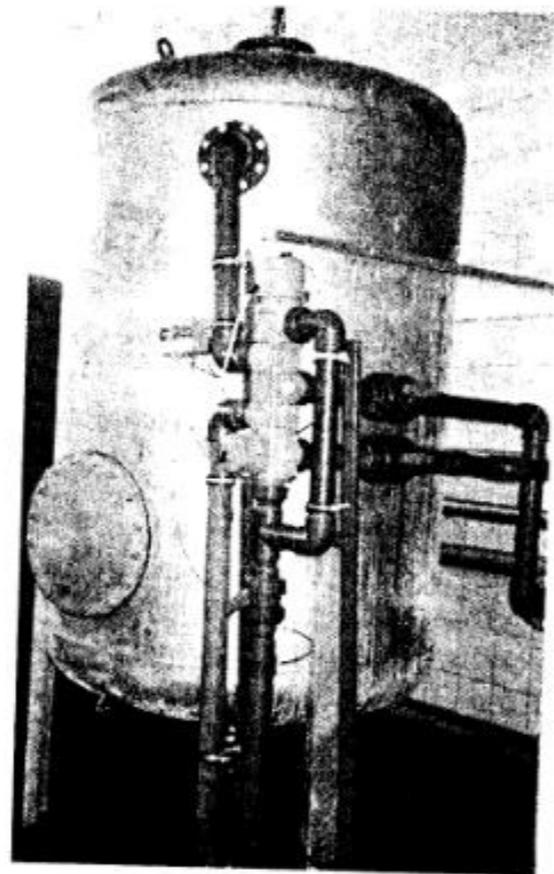
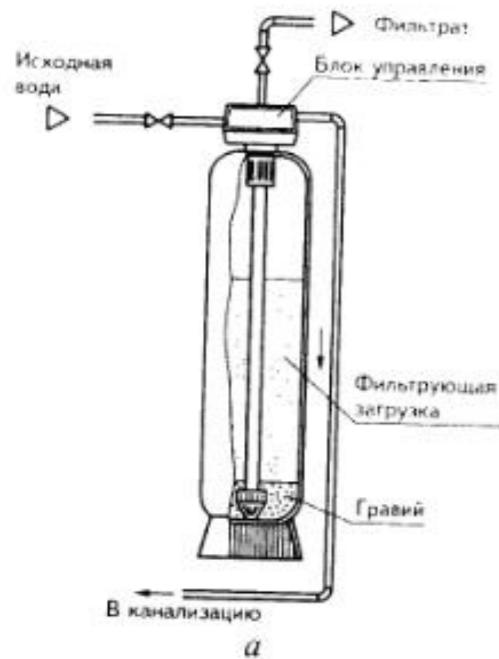


Рис. 2.6. Современные конструкции осветлительных (механических) фильтров:

а – с блоком управления, установленным на корпусе; б – с отдельными управляемыми клапанами на трубопроводах; в – с многоходовым управляемым клапаном

Для фильтров больших производительности и диаметра используются управляемые клапаны (задвижки), устанавливаемые на питающих тру-

бопроводах. Они могут быть индивидуальными на каждой линии или многоходовыми, одновременно переключающими все потоки (рис. 2.6. б, в).

Основными производителями блоков управления являются фирмы «Fleck», «Siata» (Pentair), «Autotrol» (GE Water Technologies, GE Osmonics). Параметры распространенных блоков управления, совмещенных с многоходовым клапаном в виде моноблока, фирмы «Fleck» представлены в таблице 2.5 [75].

### 2.5. Блоки автоматического управления фирмы Fleck

Характеристика	5600	2510	8500*	9000*/ 9500*	2750/ 2850	2900/ 2930	3150TM/ 3150SM	3900
Контролируемый параметр	время, объем	время, объем	время, объем	время, объем	время, объем	время, объем	время, объем	время, объем
Максимальный рабочий расход, м <sup>3</sup> /ч	4,5	4,3–5,4	2,8–3,7	5,4/ 11,2	5,9/ 11,6	23/31	28/29	56,8– 73,8
Максимальный расход при обратной промывке, м <sup>3</sup> /ч	1,6	3,8	0,8	1,9/3,3	5,6/ 11,1	5,6/ 20	24/25	24,0
Расположение на корпусе	сверху	сверху	сверху	сверху	сверху	сверху/ сверху, сбоку	сверху/ сбоку	сверху
Диаметр патрубка вход/выход	3/4 или 1	3/4 или 1	3/4	1/1 1/2	1/1 1/2	2/2	2/2	3
дренаж, дюйм	1/2	3/4	1/2	1/2	3/4/1	1 1/2	2	2
Материал клапана	бронза/ норил	бронза/ норил	бронза	бронза	бронза	бронза	бронза	бронза
Диаметр механического фильтра, дюйм	6–10	6–16	–	–	10–21/ 10–24	14–21/ 14–24	24/42	24–42
Диаметр ионообменного фильтра, дюйм	6–12	8–16	6–10	6–12/ 10–24	10–30	14–30/ 14–36	24–42/ 24–63	30–63
Объем ионита макс., л	50	150	50	150/ 300	300	450	800/ 2000	2000

\* для дуплексных фильтров.

#### 2.1.2.2. Фильтрующие загрузки для механических фильтров

Загрузка механического фильтра должна удовлетворять многим требованиям [1, 3, 6–8, 67–71]. Наиболее важны ее гидравлические характеристики. Они определяются плотностью частиц, их размерами и формой, фракционным составом.

Слой мелких частиц имеет большую удельную поверхность и малые размеры поровых каналов. Поэтому он хорошо удаляет загрязнения, но оказывает большое сопротивление при фильтрации и быстро забивается взвесями. Поскольку скорость псевдооживления мелких частиц незначительна и близка к скоростям задержанных тяжелых частиц или их слипшихся конгломератов, то при взрыхлении оказывается невозможно удалить последние из загрузки.

Слой из крупных частиц, имеющий крупные поровые каналы, имеет низкую эффективность, но большую грязеемкость. Кроме этого, чем тяжелее и крупнее частицы, тем большая скорость и, в результате, больший расход воды требуется для их отмывки (взрыхления, псевдооживления). При этом легкие загрузки с низкой скоростью псевдооживления не могут быть хорошо отмыты от задержанных крупных тяжелых взвесей.

Кроме того, загрузки должны быть прочными, не измельчающимися при фильтрации и взрыхлении, не растворяющимися в воде и не выделяющими в нее загрязнения и т. п., а также дешевыми. Если загрузка имеет широкий гранулометрический состав, то при регенерации верхние мелкие частицы могут уже уноситься из фильтра, в то время как нижние крупные частицы еще не начинают псевдооживляться. Поэтому выбор загрузок и их фракционного состава является компромиссным решением.

Традиционными загрузками механических фильтров и фильтров обезжелезивания являлись кварцевый песок и дробленый антрацит. В последние годы отечественная промышленность обеспечила выпуск таких традиционных загрузок, но значительно более высокого качества, например, кварцевый песок (Гора Хрустальная), керамзитовый гравий различных фракций, и новых видов – гидроантрацит, фильтрантрацит, стеклощебень, горелые породы, цеолиты, со значительно лучшими характеристиками, чем ранее применявшиеся загрузки. Например, гидроантрацит типа Пуrolат имеет более высокую пористость по сравнению с обычными антрацитами, минимальное количество мелких фракций, выпускается с различным гранулометрическим составом (0,5–1,2; 0,6–1,2; 0,6–1,6; 0,6–1,8; 0,8–2,0; 1–3 мм), что позволяет создавать многослойные фильтры. В результате повышается эффективность – выше грязеемкость, более продолжительный фильтроцикл, меньший расход воды на регенерацию. Аналогичные материалы предлагают и многие зарубежные фирмы. Кроме того, в их ассортименте имеются и другие материалы, такие как Filter-Ag (FAG), представляющий безводный оксид кремния с большой поверхностью, цеолиты клиноптилолитного типа, гранитная крошка, гарнет и т. п. Их основное преимущество – высокая стабильность показателей, возможность выбора заданного достаточно узкого фракционного состава и удобная упаковка. Отсортированного окатанного гравия, необходимого для малогабаритных фильтров, наши

предприятия пока не производят. Поставка загрузок производится в мешках по 25, 28, 50 кг или в контейнерах по 1 м<sup>3</sup>.

Параметры серийных фильтров, выпускаемых ТКЗ и БКЗ из углеродистой стали, представлены в таблице 2.2 [49, 50].

Отечественными компаниями предлагаются современные механические фильтры, собранные из комплектующих в основном зарубежного производства, диаметром от 100 до 1600 мм, из оцинкованной стали или пластика (табл. 2.6).

### 2.6. Механические фильтры распространенных размеров на базе зарубежных комплектующих

Модель – диаметр и высота корпуса в дюймах – тип блока управления	Габаритные размеры, высота/диаметр, мм	Присоединительные размеры, вход/выход/дренаж, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Объем фильтрующего материала, л	Объем гравия, л	Подача воды на промывку, не менее, м <sup>3</sup> /ч	Объем воды на промывку, м <sup>3</sup>
ФОВ-0844Т-500	1120/210	20/20/15	0,4/0,5	20	5	1,0	0,2
ФОВ-0844Т-251	1120/210	25/25/15	0,4/0,5	20	5	1,0	0,2
ФОВ-1054Т-500	1375/260	20/20/15	0,6/0,8	40	7	1,5	0,40
ФОВ-1054Т-251	1375/260	25/25/15	0,6/0,8	40	7	1,5	0,40
ФОВ-1354Т-500	1375/330	20/20/15	1,0/1,3	60	12	2,5	0,65
ФОВ-1354Т-251	1375/330	25/25/15	1,0/1,3	60	12	2,5	0,65
ФОВ-1354Т-275	1375/330	25/25/20	1,0/1,3	60	12	2,5	0,65
ФОВ-1465Т-251	1660/370	25/25/15	1,2/1,5	85	15	3,0	0,75
ФОВ-1465Т-275	1660/370	25/25/20	1,2/1,5	85	15	3,0	0,75
ФОВ-1665Т-251	1660/410	25/25/15	1,5/2,0	100	20	3,8	1,0
ФОВ-1665Т-275	1660/410	25/25/20	1,5/2,0	100	20	3,8	1,0
ФОВ-1865Т-275	1787/470	25/25/20	2,0/2,5	150	30	5,0	1,25
ФОВ-1865Т-285	1787/470	40/40/25	2,0/2,5	150	30	5,0	1,25
ФОВ-2160Т-275*	1760/560	25/25/20	2,5/3,3	175	50	6,5	1,55
ФОВ-2160Т-285	1790/560	40/40/25	2,5/3,3	175	50	6,5	1,55
ФОВ-2469Т-285*	2130/625	40/40/25	3,0/3,5	200	75	8,0	2,15
ФОВ-2469Т-315	2220/625	50/50/50	3,0/3,5	200	75	8,0	2,15
ФОВ-80Т-315**	2160/800	50/50/50	4,5/5,5	600	125	9,5	2,75
ФОВ-110Т-315**	2550/1100	50/50/50	9,5/11,5	1150	300	8,0	7,15

Блоки управления: 500 – Fleck 5000, 251 – Fleck 5100, 275 – Fleck 2750, 285 – Fleck 2850, 315 – Fleck 3150.

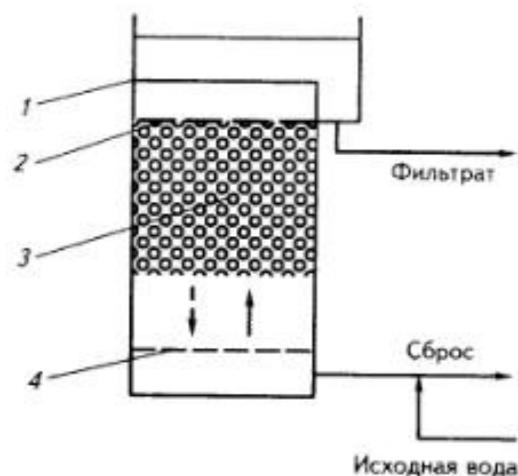
Параметры приведены для скорости фильтрации 10–12 м/ч, потери напора 0,3–0,4 атм, продолжительности взрыхления 10 мин, санитарной отмывки – 6 мин.

\* – с легкой загрузкой; \*\* – корпуса из оцинкованной стали.

### 2.1.2.3. Фильтры с плавающей загрузкой

Перспективным направлением в технике фильтрации воды является разработка фильтров с плавающей загрузкой [7, 8, 76–82]. В них используются гранулы вспененного полистирола с очень низкой плотностью, порядка 50–100 г/л. Такие гранулы имеют более высокие адгезионные и электрокинетические свойства, чем у песка, и их применение интенсифицирует процесс фильтрования. Так, фильтры с плавающей загрузкой позволяют работать с более загрязненной водой и с большей скоростью фильтрования, упростить регенерацию загрузки, отказаться от использования дополнительных насосов и емкостей для промывной воды.

Возможно использование плавающей загрузки в стандартных стальных корпусах, у которых дренажное устройство размещено сверху. Скорость фильтрования определяется давлением (напором) поступающей воды. Считается, что она может быть выше, чем для тяжелых загрузок [8, 76].



**Рис. 2.7.** Безнапорный фильтр с плавающей загрузкой:

1 – корпус; 2 – опорная решетка; 3 – плавающая загрузка; 4 – распределительная решетка

Более интересен вариант безнапорных фильтров с движением воды сверху вниз. Длительное время проводится разработка конструкций таких аппаратов. В общем виде безнапорный фильтр с плавающей загрузкой (рис. 2.7) представляет собой емкость, часто прямоугольного сечения 1, в верхней части которой устанавливается перфорированная решетка 2 с отверстиями меньшими, чем размер гранул. Эта решетка является критическим элементом конструкции, поскольку она выполняет ряд функций – задержание наименьших частиц загрузки, а также равномерный сбор воды при фильтрации и ее распределение при взрыхлении. При этом она должна обладать высокой прочностью, поскольку воспринимает выталкивающую силу всплывающих гранул и перепад давления при фильтрации. В нижней части фильтра установлено распределительное устройство для ввода очищаемой воды 4, а в верхней – патрубок вывода очищенного раствора. Патрубок располагается выше решетки так, чтобы над ней находился запас воды, необходимый для регенерации.

При очистке воды она подается снизу через распределитель, фильтруется через слой плавающих пенополистирольных шариков и, пройдя через решетку, попадает в верхнюю буферную зону. Очищенная

вода выводится через патрубок. При загрязнении фильтрующей загрузки производится ее регенерация. Для этого подача воды на очистку прекращается, открывается сбросной клапан и очищенная вода из зоны, расположенной выше решетки, самотеком устремляется вниз, оживая полистирольную загрузку. При кипячении ее слоя происходит отмывка частиц от загрязнений, которые вместе с потоком воды удаляются из аппарата.

В ЗАО «Аквастройсервис» разработали серию конструкций аппаратов такого типа – «установки Ремизова» с чисто гидравлической системой саморегулирования без какой-либо автоматики и запорной арматуры [82].

Преимуществом фильтров с плавающей загрузкой наряду с высокой грязеемкостью, является отсутствие энергозатрат на проведение промывки загрузки, простая схема управления, практическая неистираемость загрузки при высокой ее способности к отмывке.

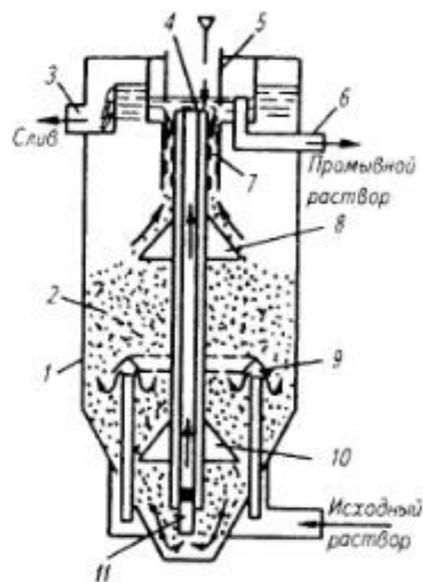
Предлагаются варианты использования таких фильтров для совместного процесса сорбции-осветления [79, 80].

### 2.1.2.4. Фильтры непрерывного действия

Длительное время во всем мире разрабатываются многочисленные варианты фильтров непрерывного действия [83–86]. Основная их идея состоит в одновременном проведении процессов очистки воды и регенерации загрузки в различных по размерам и конструкции аппаратах или их секциях. Это позволяет оптимизировать каждый из процессов, т. е. проводить их с наибольшей эффективностью. Основные трудности при создании таких аппаратов состоят в организации перемещения загрузки между узлами очистки и регенерации.

Наибольший успех был достигнут при создании фильтров с движущимся слоем песка – Динасенд и Астрасенд, которые применяют за рубежом более 20 лет [83–86]. Такой фильтр (рис. 2.8) состоит из вертикального безнапорного цилиндрического корпуса с коническим дном, внутри которого размещены: внизу – распределитель раствора 9, а вверху – сборный желоб 3 для отвода чистой воды. По центру расположен эрлифт 11 и отмывочная колонна 7. Внутренний объем фильтра заполнен специальным высокопрочным песком определенной фракции 2. Загрязненная вода подается снизу через распределитель в слой песка и фильтруется вверх, очищаясь от механических примесей. Песок, содержащий извлеченные загрязнения, откачивается снизу эрлифтом, т. е. с помощью воздуха, подаваемого в нижнюю часть центральной трубы. Воздух, поднимаясь по ней с высокой скоростью, увлекает с собой воду и частички песка. При движении в эрлифте происходит интенсивное трение частичек друг о друга и о стенки трубы, при котором с них удаляются загрязнения. В верхней части фильтра песок со смывными загрязнениями попадает в отмывочную колонку 7, в которую снизу за счет перепада уровней подается осветленная вода. При движении песка вниз,

противотоком к отмывочной воде, происходит его отмывка. Затем через распределитель песка 8 чистые частицы песка равномерно падают на слой загрузки. Таким образом происходит непрерывное и одновременное фильтрование воды и отмывка песка. Движение слоя песка в фильтре происходит противотоком к движению очищаемой воды. Поэтому достигается высокое качество очистки воды при большой грязеемкости загрузки. Регулируя скорость циркуляции песка и расход воды на отмывку, можно производить очистку вод различной загрязненности.



**Рис. 2.8.** Механический фильтр непрерывного действия Динасенд:

1 – корпус; 2 – фильтрующая загрузка; 3 – желоб; 4, 7 – узел регенерации; 5 – кольцевой отстойник; 6 – сливной патрубок; 8, 10 – конуса-распределители; 9 – распределитель раствора; 11 – ээрлифт

Высокая грязеемкость таких фильтров позволяет производить контактную коагуляцию с введением реагентов в воду непосредственно перед ее подачей в фильтр. Это дает возможность исключить малопродуктивные отстойники и резко уменьшить габариты установок очистки воды от взвесей.

Удельная производительность таких фильтров ограничивается скоростью начала псевдооживления частиц песка и составляет обычно до  $10\text{--}12\text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$ . Они легко соединяются в параллельные блоки, имеющие производительность до тысяч  $\text{м}^3/\text{ч}$ . За рубежом работают сотни таких аппаратов. Близкие по конструкции аппараты производительностью  $30\text{ м}^3/\text{ч}$  были разработаны в России в конце 80 – начале 90 гг. автором данной работы, но их внедрения не произошло из-за остановки предприятий-заказчиков [83].

### 2.1.3. Фильтрация через пористую перегородку

#### 2.1.3.1. Мембранные методы

Другим относительно новым, развиваемым с 60-х гг. XX века, направлением в технике фильтрации является использование мелкопористых материалов – мембран различной природы с каналами разного размера и вида [1, 4, 7, 8, 16–20, 26–42, 87–133]. Такие материалы могут быть в виде полимерной бумаги, ткани, многослойной пленки, керамики, металлокерамики, спеченных металлических микрошариков, сеток и т. п.

Современные технологии позволяют изготавливать плоские или объемные материалы с однородными каналами практически любого размера. Причем проходное (свободное) сечение таких материалов может составлять 40–85%.

На рисунке 2.1 показано, что все загрязнения различной природы могут характеризоваться размерами, которые находятся в определенных границах. Если пропускать раствор, содержащий такие загрязнения, через полупроницаемую перегородку с отверстиями меньшими, чем размер частиц загрязнений, то данные частицы будут задержаны перегородкой, а очищенная вода пройдет через нее. Таким образом, используя пористую среду с определенным размером отверстий, можно удалить все загрязнения, имеющие размер больше, чем у пор.

Мембранные процессы включают в себя:

- макрофильтрацию;
- микрофильтрацию;
- ультрафильтрацию;
- нанофильтрацию;
- обратный осмос.

**Макрофильтрация – МАФ** – это механическая фильтрация с удалением крупных видимых твердых частиц с размером  $1\text{--}100\text{ мкм}$ . Как правило, МАФ осуществляется на металлических и полимерных сетках различного типа с регенерацией обратным током очищенной воды.

**Микрофильтрация – МФ** – удаляет мелкие взвеси и коллоидные частицы, микроорганизмы (бактерии) с размером  $0,1\text{--}1,0\text{ мкм}$ , определяемые как мутность или опалесценция раствора. Рабочее давление от 0,1 до 2,0 атм.

**Ультрафильтрация – УФ** – извлекает из воды коллоидные частицы, микроорганизмы (бактерии и вирусы), крупные органические макромолекулы, определяющие цветность воды, имеющие размер  $0,01\text{--}0,1\text{ мкм}$  и молекулярную массу более 1000. Рабочее давление от 0,7 до 7,0 атм. Степень концентрирования исходного раствора для ультрафильтрации лимитируется началом гелеобразования или концентрацией, при которой неприемлемо падает производительность из-за возрастания вязкости жидкости.

**Обратный осмос и нанофильтрация** очень близки по механизму разделения, схеме организации процесса, рабочему давлению, мембранам и оборудованию. Первым был разработан метод обратного осмоса. Принцип его действия основан на явлении осмоса – самопроизвольного перехода растворителя через полупроницаемую мембрану в раствор. Если чистую воду и водный раствор какого либо вещества поместить по разные стороны полупроницаемой мембраны, которая может пропускать только молекулы воды, то в такой системе будет наблюдаться пе-

переход молекул воды в объем, где находится раствор (рис. 2.9, а). Это происходит из-за разности концентраций в объемах, разделенных мембраной. Давление, при котором наступает равновесие, называют осмотическим (рис. 2.9, б). Если со стороны раствора приложить давление, превышающее осмотическое, то молекулы воды будут двигаться через мембрану в направлении, противоположном прямому осмосу (рис. 2.9, в). При этом может быть получена чистая обессоленная вода и концентрат солей. Такой процесс называется обратным осмосом.

**Обратный осмос – ОО** – характеризуется использованием мембран с минимальным размером пор, соизмеримым с размером одиночных ионов, поэтому извлекаются все растворенные ионы и органические молекулы. Рабочее давление от 7 до 70 атм.

Эффективность удаления методом обратного осмоса различных ионов зависит от их заряда и размера, определяющих степень гидратации, и увеличивается с ростом этих характеристик. Коэффициенты очистки имеют следующие значения: по одновалентным ионам  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  равные 50–100, а по двухвалентным  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  – более 100. Степень очистки от поливалентных элементов зависит от их состояния в растворе. Степень очистки от элементов, склонных к гидролизу и образованию псевдоколлоидов, значительно выше, чем от солей.

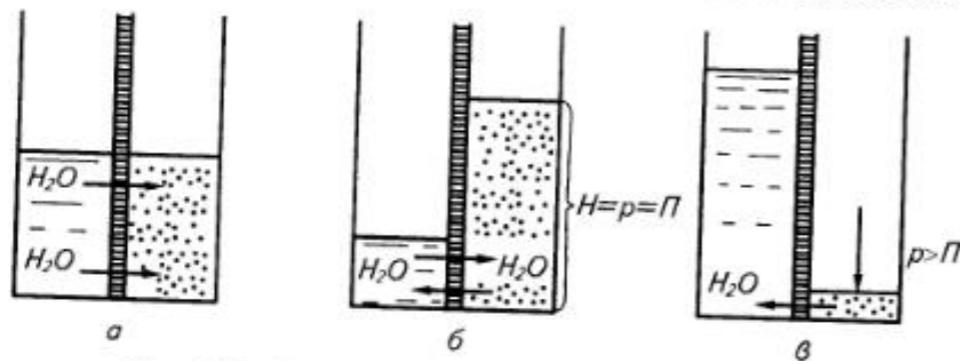


Рис. 2.9. Принцип действия обратного осмоса:

а – осмос; б – равновесное состояние; в – обратный осмос.  
 $H$  – высота столба воды;  $p$  – давление;  $\Pi$  – осмотическое давление

Однако использование обратного осмоса имеет ряд ограничений. Наиболее эффективно применение обратного осмоса при солесодержании исходной воды 0,5–5 г/л. Максимальное солесодержание концентрации ограничивается его осмотическим давлением, а также концентрационной поляризацией. Концентрационная поляризация заключается в том, что в тонком примембранном слое возрастает концентрация растворенного вещества вследствие преимущественного переноса через мембрану молекул воды. Это приводит к уменьшению эффективного давления, так как возрастает осмотическое давление раствора. Концентрационная поляризация способствует пересыщению раствора по солям у поверхности

мембраны и отложению на ней малорастворимых солей. Влияние концентрационной поляризации можно уменьшить, если турбулизировать пограничный слой воды. Это способствует выравниванию концентрации раствора в межмембранном пространстве. Обычным методом снижения влияния концентрационной поляризации является увеличение скорости протекания обрабатываемой воды вдоль поверхности мембран.

**Наночистка – НФ** – удаляет молекулы и многозарядные ионы, имеющие размер от 0,001 до 0,01 мкм, органические молекулы с молекулярной массой выше 300, и все вирусы. Рабочее давление от 7 до 16 атм.

НФ способна удалять ионы с зарядом больше 1, а однозарядные пропускать – извлечение  $\text{NaCl}$  составляет менее 50%. Селективность по двухзарядным катионам и анионам высокая, например, при фильтрации раствора  $\text{MgSO}_4$  извлечение превышает 98–99%. Тяжелые металлы удаляются практически полностью. В результате степень обессоливания ниже, чем при обратном осмосе, но фильтрат почти не содержит солей жесткости, т. е. он умягчается. Селективность к органике с молекулярной массой более 150–300 обеспечивает снижение цветности и окисляемости.

Сравнение различных мембранных методов по степени удаления из воды ионов и биологических загрязнений дано в таблице 2.7.

### 2.7. Сравнение мембранных методов по степени удаления загрязнений

Вещество	Степень удаления, %				
	МФ	УФ	НФ	Низконапорный ОО	ОО
$\text{NaCl}$	0	0	0–50	70–95	99
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	0	0	99	80–95	99
$\text{CaCl}_2$	0	0	0–60	80–95	99
$\text{MgSO}_4$	0	0	>99	95–98	>99
$\text{H}_2\text{SO}_4$	0	0	0	80–90	99
$\text{HCl}$	0	0	0	70–85	99
Вирусы	0	99	99,99	99,99	99,99
Бактерии	>50	99	99,99	99,99	99,99

Мембранные процессы могут быть условно разделены на два класса, различающихся по размерам извлекаемых частиц и механизму разделения. Макро- и микрофильтрация, ультрафильтрация удаляют механические или биологические частицы, крупные молекулы полимеров (рис. 2.1), характеризуются ситовым механизмом разделения и относятся к механическим процессам. При наночистке и обратном осмосе из раствора извлекаются молекулы или ионы растворенных солей; разделение происходит на молекулярном уровне. На разделение влияют физико-химические процессы, такие как гидратация, адсорбция и др., и наряду с гидравлическим сопротивлением мембран необходимо преодолеть так называемый осмотический эффект. При УФ, НФ и ОО

большую роль играет т. н. концентрационная поляризация, которая заключается в повышении концентрации задерживаемых мембраной веществ в непосредственной близости от поверхности мембраны. Она снижает производительность и требует повышения рабочего давления. Существенную роль играет также образование на ее поверхности осадка нерастворимых веществ, содержащихся в растворе либо образующихся у поверхности при увеличении их концентрации.

Четкой границы между всеми этими методами нет.

Поскольку границы использования этих методов расплывчаты и методы перекрывают друг друга (рис. 2.1), а применяемые для них мембраны и мембранные элементы по конструкции, размерам и многим характеристикам схожи, вначале будут рассмотрены общие для всех этих методов элементы, устройства, принципы действия, а также аппаратное оформление.

В качестве мембран используются различные мелкопористые материалы: в основном это пленки, трубки и полые волокна из полимеров, а также пластины и трубки из керамики, металлокерамики, спеченных металлических микрошариков, сетки из металла и полимеров и т. п. В соответствии с применяемым материалом создается конструкция фильтрующего элемента и фильтра.

### 2.1.3.2. Требования к мембранам

Полупроницаемые мембраны должны удовлетворять ряду требований, иметь:

- узкое распределение пор по размерам, что обеспечивает высокую разделяющую способность – селективность;
- анизотропное строение;
- высокую проницаемость, т. е. удельную производительность;
- химическую стойкость к действию разделяемой среды, регенерирующим и стерилизующим реагентам;
- стабильность характеристик во времени;
- механическую прочность;
- отсутствие выноса материала мембран в фильтрат;
- низкую стоимость.

В ряде случаев предъявляются и специфические требования, характерные для конкретного производства.

### 2.1.3.3. Эффективность процесса разделения

Эффективность мембранного процесса [16–18, 41, 42, 104, 110–114] определяется в основном свойствами мембран. Основными характеристиками мембран являются задерживающая способность, удельная про-

изводительность и селективность мембран, а также их химическая стойкость в разных растворах при различных значениях pH.

**Селективность**  $\phi$  по разделяющим компонентам определяется как

$$\phi = (1 - C_2/C_1) \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

где  $C_1$  – концентрация растворенного вещества в исходном растворе;  $C_2$  – концентрация растворенного вещества в очищенной воде.

**Проницаемость**  $g$ , или удельная производительность мембраны при постоянном давлении, характеризуется объемом прошедшего фильтрата (пермеата) в единицу времени через единицу поверхности и пропорциональна разности приложенного и осмотического давления:

$$g = Q_n/F \cdot \tau = K \cdot (p - \Delta\pi), \text{ мл/см}^2 \cdot \text{мин или л/м}^2 \cdot \text{ч}, \quad (2.2)$$

где  $Q_n$  – расход фильтрата;  $F$  – поверхность мембраны;  $\tau$  – время разделения;  $K$  – коэффициент проницаемости мембраны;  $p$  – приложенное давление;  $\Delta\pi$  – разность осмотических давлений растворов с обеих сторон мембраны.

**Удельная производительность** мембраны или элемента определяется как расход фильтрата  $Q_n$  в л/ч, отнесенный к площади мембраны  $F$ , м<sup>2</sup>, и к рабочему давлению  $P$ , МПа:

$$W_p = Q_n/P \cdot F \text{ (л/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{МПа)}. \quad (2.3)$$

**Конверсия**, т. е. степень использования воды, выражается в процентах выхода пермеата от расхода исходного раствора:

$$K = Q_n/Q_u \cdot 100 (\%). \quad (2.4)$$

Ряд мембран обладает свойствами усадки (уплотнением структуры мембраны под действием давления). Это может в 2–3 раза изменить удельную производительность.

Удельная производительность и селективность зависят от рабочего давления и температуры  $t$  раствора. С ростом давления увеличивается производительность и селективность (рис. 2.10, а). Если первое следует из зависимости (2.2), то последнее объясняется некоторым сжатием (усадкой) мембраны и уменьшением размера пор. Повышение температуры приводит за счет снижения вязкости воды и соответствующего увеличения подвижности извлекаемых ионов или молекул к росту удельной производительности мембраны, но и к уменьшению селективности (рис. 2.10, б).

Увеличение конверсии возможно до определенного предела (рис. 2.10, в), пока при росте содержания солей в концентрате их осмотическое давление не приблизится к давлению питающей воды. Тогда процесс переноса прекращается.

Увеличение концентрации компонентов в питающем растворе сокращает выход пермеата и селективность (рис. 2.10, г).

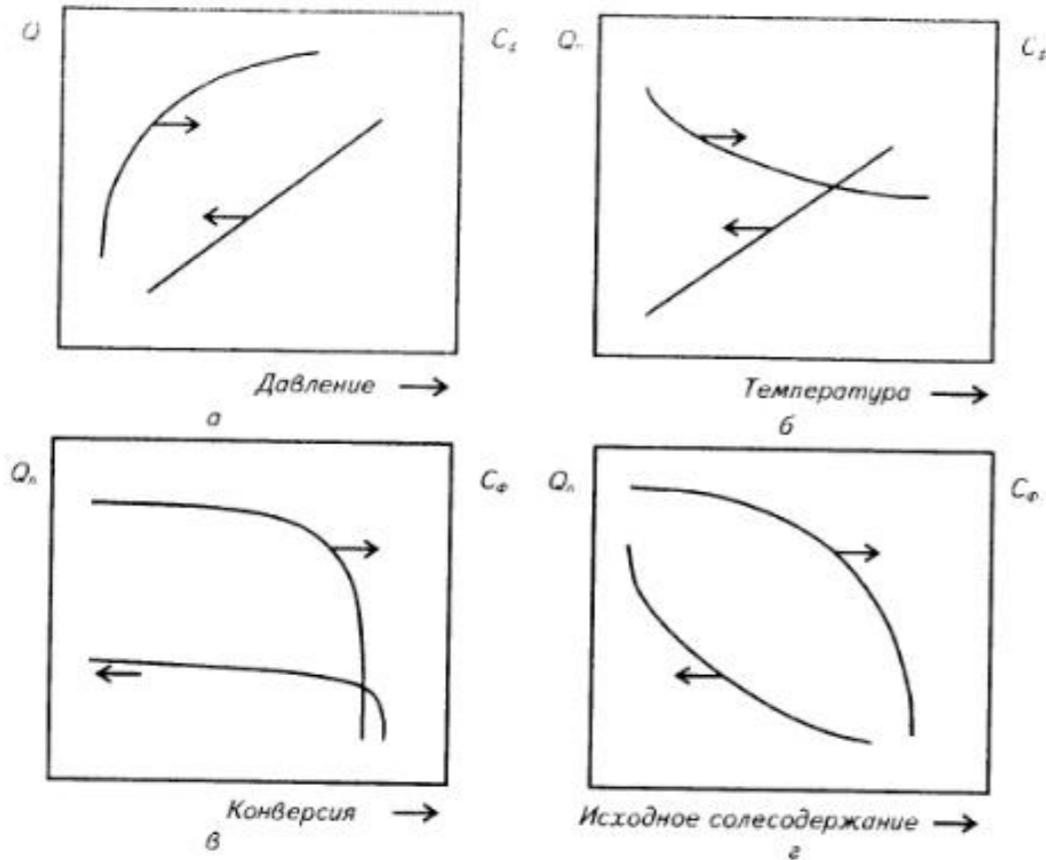


Рис. 2.10. Зависимость производительности и селективности мембраны от внешних параметров:

$Q_n$  – производительность;  $C_p$  – селективность

#### 2.1.3.4. Организация процесса фильтрации

Важнейшее различие мембранных процессов состоит в методах организации продолжительной работы фильтров. Это:

- однократное использование фильтрующего элемента с большой грязеемкостью;
- регенерация мембраны обратным током очищенной воды;
- предотвращение загрязнения пор мембраны путем создания специального гидродинамического режима.

В первом случае раствор подается на поверхность мембраны и фильтруется через нее. Все загрязнения собираются на поверхности или в объеме мембраны. Такой способ фильтрации называется **фронтальной, или тупиковой фильтрацией** (рис. 2.11, а). В этом режиме мембраны в основном используются однократно без регенерации. Тупиковую фильтрацию применяют для очистки слабозагрязненных, предварительно профильтрованных растворов, когда ресурс мембраны может быть большим.

Для некоторых типов мембран и мембранных элементов возможна организация их **регенерации обратным током фильтрата**. В этом случае мембрана некоторое время работает в тупиковом режиме, а затем направление движения раствора изменяют на противоположное. Задержанные мембраной загрязнения при этом частично или полностью удаляются с ее поверхности.

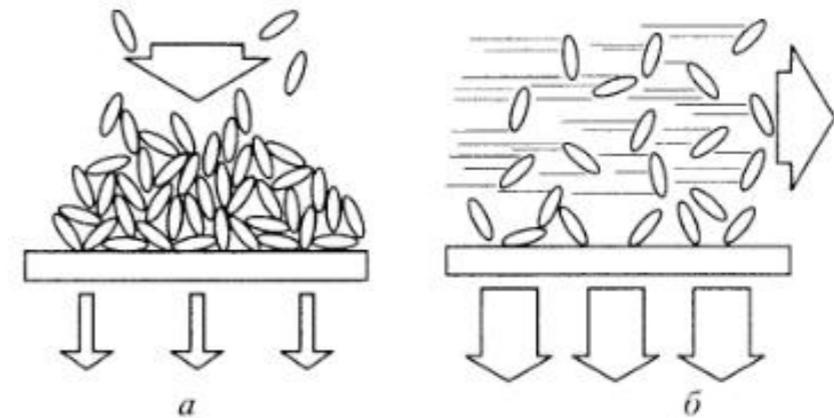


Рис. 2.11. Принцип работы фронтальной (тупиковой) (а) и тангенциальной (б) фильтрации

Для обеспечения длительной работы мембраны необходимо уменьшить концентрацию в примембранном слое и его толщину, т. е. снизить поляризационный эффект и предотвратить загрязнение ее пор осадками. Для этого над поверхностью мембраны создается интенсивный, желательнее турбулентный, поток обрабатываемой жидкости и только часть раствора фильтруется через нее (рис. 2.11, б). В результате обработки образуются два постоянных потока: фильтрат, также называемый пермеатом, и концентрат. Такой процесс называется **тангенциальной фильтрацией**.

В соответствии со способом использования мембран мембранные элементы могут быть нескольких видов:

1. Тупиковые одноразовые легкозаменяемые патроны или картриджи для МАФ и МФ.
2. Тупиковые, регенерируемые обратным током фильтрата, в виде:
  - металлических и пластиковых сеток для МАФ;
  - керамических, металлокерамических, стекло- и графитопластиковых трубок без или с разделительным слоем для МФ и УФ;
  - полволоконных элементов для МФ и УФ;
  - модернизированных рулонных элементов для МФ и УФ.
3. С тангенциальной фильтрацией:
  - полимерные и металлокерамические пленки с разделительным слоем для плоскорамных и дисковых аппаратов для МФ и УФ;

- керамические, стекло- и графитопластиковые трубки с разделительным слоем для МФ, УФ и частично НФ;
- полволоконные элементы для УФ, НФ и ОО;
- ролонные элементы для НФ и ОО.

### Материал мембран

В качестве материалов для изготовления мембран применяются металлическая проволока и нити из полимеров, керамика и металлокерамика, стекло- и графитопласты, а из полимеров – ацетаты целлюлозы, ароматические полиамиды, полисульфонамид, полиугилен, полипропилен и фторопласты. Причем многие материалы используются для мембран различной конструкции и области применения. Поэтому подробнее о материалах будет указано при рассмотрении каждого вида мембран.

#### 2.1.3.5. Тупиковая фильтрация

Фронтальная (тупиковая) фильтрация реализуется в так называемых картриджных (патронных) фильтрах, основой которых является сменный фильтрующий элемент – картридж, или патрон. Мембраны с отверстиями 0,1–100 мкм для задержания частиц таких размеров стоят относительно дешево. Поэтому они часто используются однократно. В настоящее время мировыми и отечественными производителями разработана и выпускается огромная номенклатура картриджей с тонкостью фильтрации (рейтингом) от 0,05 до 100 мкм из самых разных материалов.

Они бывают двух основных типов – с поверхностной и объемной фильтрацией. В первом случае используется тонкослойная мембрана типа пленки или бумаги. Раствор пропускается через мембрану и все взвеси с размером, большим размера ее отверстий, задерживаются и накапливаются на ее поверхности (рис. 2.11, а). Во втором случае –

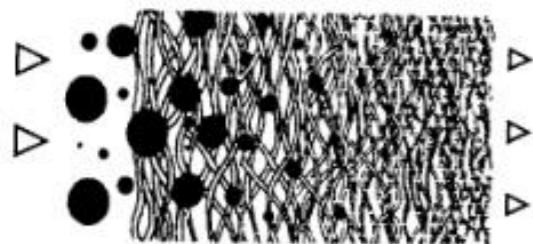


Рис. 2.12. Принцип работы многослойного «глубинного» фильтра

это многослойная конструкция со специально подобранным распределением пор по ее глубине (рис. 2.12), таким, что их отверстия уменьшаются от периферии к центру. В таком картридже тонкость фильтрации обеспечивается самым мелкопористым слоем, а грязеемкость – всем объемом картриджа.

Между разработчиками этих направлений постоянно идет жесткая конкуренция по повышению качества очистки и увеличению грязеемкости. Первое обеспечивается созданием одинаковых пор по всей поверхности мембраны. Повышение грязеемкости пленочных «бумажных»

фильтров достигается увеличением их рабочей поверхности путем гофрировки, что также снижает гидродинамическое сопротивление и повышается производительность, а для объемных – оптимизацией слоистой структуры.

Следует отметить, что «бумажные» элементы могут быть частично регенерированы вне фильтра отмывкой от загрязнений струей воды и мягкой щеткой, а также низкоинтенсивной обратной промывкой. Объемные элементы, в реальной жизни, практически не поддаются регенерации, кроме тех случаев, когда задержанные частицы могут быть растворены химическими реактивами.

Конструкция сменных элементов и их размеры были разработаны в 60-х гг. фирмами Millirog и Pall [87, 88] и стали мировым стандартом. Различаются два основных типа картриджей с плоскими торцами и со специальным фланцем, снабженным уплотняющими кольцами (рис. 2.13). Остальные конструкции представляют собой их варианты, предназначенные для разных корпусов и обеспечивающие возможность увеличения рабочей длины путем соединения нескольких картриджей.

Стандартные размеры картриджей составляют:

Длина: для импортных – 254 (10"), 508 (20"), 762 (30"), 1016 (40") мм; для отечественных – 250, 500, 750, 1000 мм либо аналогичная импортным.

Диаметр: стандартные 67–70 и для «Big Blue» 114–115 мм.

Элементы с фланцем имеют посадочный диаметр 44,5 либо 56 мм.

**Патронный фильтрующий элемент (картридж)** представляет собой перфорированный цилиндр, на который уложен фильтровальный материал (пленочный, тканый, волоконный, порошок, нитяной или сетчатый), к торцам которого приварены концевые детали.

В мембранных (пленочных) элементах используется листовая мембрана, которая для увеличения площади фильтрации гофрируется. Торцы мембраны герметично заделываются в концевые детали.

В качестве мембраны могут использоваться металлические и полимерные сетки саржевого плетения, закрепленные на специальном каркасе.

Полимерные мембраны изготавливаются из капрона, стекловолокна, целлюлозы и полипропилена, а также из фторопласта [87–93, 104, 110–112]. Фторопластовые мембраны могут быть гидрофильными или гидрофобными. Они предназначены для высокоагрессивных сред и для работ при высокой температуре. Тонкость фильтрации, т. е. рейтинг, пленочных фильтров составляет до 0,05 мкм. Степень задержания частиц с размером, соответствующим рейтингу мембраны, составляет до 99% для мембран отечественных производителей и 99,9% для изделий, например, фирмы «Harmsco». Последняя производит картриджи из гофрированной пленки из смеси целлюлозы с полиэстером с увеличенной площадью фильтрации и соответственно с большими производительностью и грязеемкостью.

Для особо тонкой очистки воды представляют интерес так называемые «ядерные» фильтры [98]. Они получают при облучении лавсановой пленки в ускорителе тяжелыми ионами с последующим протравливанием полученных отверстий. Такие мембраны характеризуются высокой равномерностью размеров отверстий, но малым проходным сечением.

**Глубинные элементы** изготавливаются из полиэтилена, полипропилена, фторопласта. Наилучшие характеристики по эффективности и грязеемкости обеспечивают многослойные элементы из полипропиленового волокна (рис. 2.12).

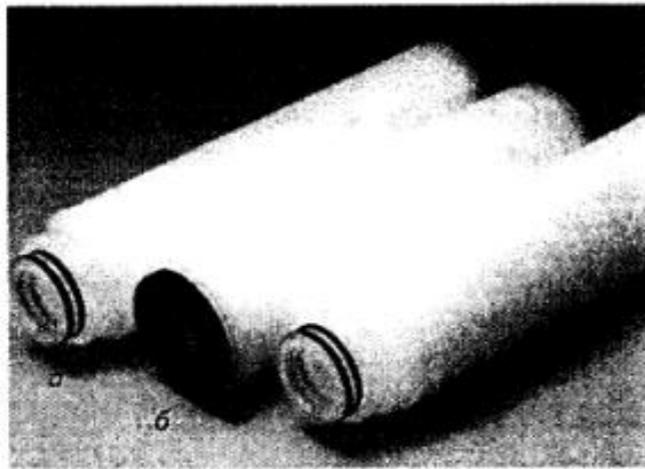


Рис. 2.13. Основные типы картриджей и их уплотнений:

*а* – со специальным фланцем, снабженным уплотняющими кольцами; *б* – с плоскими торцами

Элементы, изготовленные намоткой полипропиленового штагата, имеют номинальную тонкость фильтрации 0,5–50 мкм, но реально не обеспечивают гарантированного задержания частиц заданного размера и предназначаются для грубой префильтрации. Их стоимость минимальна.

Описанные картриджи в зависимости от размера пор используются для макро- и микрофильтрации. В промышленности такие фильтры наиболее широко используются для предварительной фильтрации перед ОО и НФ, а также для стерилизации растворов, фильтрации пива и придания «блеска» питьевой воде и водке. В бытовых установках они часто применяются для удаления взвесей и окисленного железа.

Основными отечественными производителями картриджей различного типа и фильтродержателей являются бывшие предприятия Минатома: ООО «Промфильтр» (Дубна) [89], НПП «Тензор» [90], НПП «Экспресс-Эко» (Обнинск) [91], ЗАО «Фильтр» (Товарково) [92], а также ЗАО НТЦ «Владипор», НПП «Технофильтр» (Владимир) [93]. Крупнейшими западными производителями являются компании «Millipore» [87], «Pall» [88], «Osmonics», «Harmsco», «Ametek», «US Filter», «Atlas Filter».

**Корпуса фильтров, т. е. фильтродержатели,** в зависимости от требуемой производительности рассчитываются на установку одного или нескольких картриджей, соответственно они называются одно- или многопатронные. Они изготавливаются из различных марок пластмасс и нержавеющей стали.

*Однопатронные* корпуса выпускаются огромным количеством производителей и рассчитываются в основном на патроны с диаметром 67–70 мм (рис. 2.14, *а*). Выпускаются также корпуса под картриджи диаметром 114 мм – так называемые по размеру и цвету корпуса «Big Blue» (рис. 2.14, *б*). Высота корпусов позволяет устанавливать 1, 2, 3 или 4 стандартных картриджа, соединенных последовательно в одну сборку, либо менее распространенные картриджи соответствующей длины 250, 500, 750 и 1000 мм. Производительность определяется типом картриджа и пропорциональна количеству и высоте установленных картриджей.

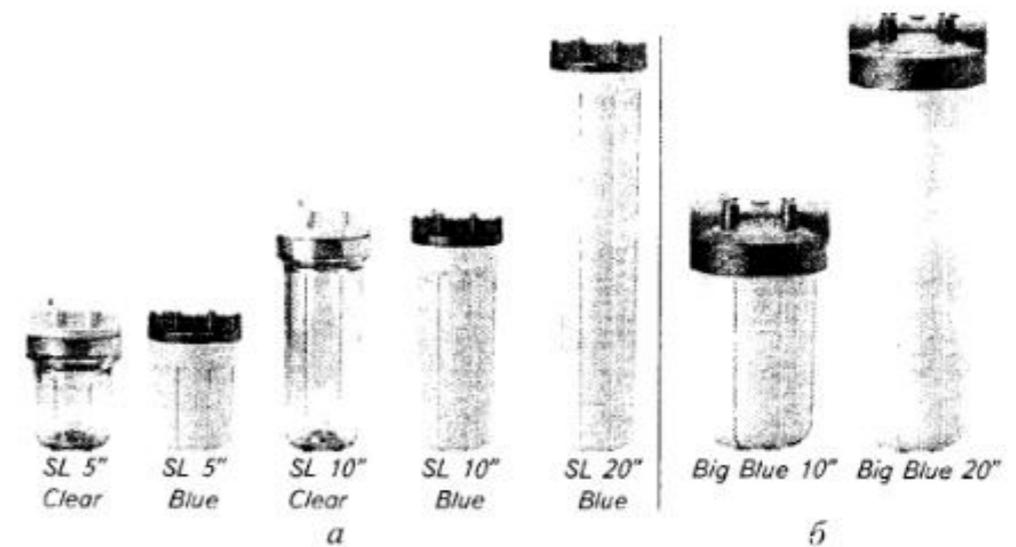


Рис. 2.14. Корпуса, рассчитанные на 1 картридж, высотой 5, 10, 20" и диаметром 67–70 (*а*) и 114 мм (*б*)

*Многopatронные* корпуса (рис. 2.15) используются, когда необходимо обеспечить еще большую производительность. В РФ серийно выпускаются корпуса, рассчитанные на установку до 8 элементов длиной 750 мм, производительностью до 15 м<sup>3</sup>/ч, а за рубежом до 200 стандартных 250 мм картриджей (или 100×500 мм) производительностью до 200 м<sup>3</sup>/ч.

Интересным решением являются фильтры «Ураган» («Hurricane») фирмы «Harmsco», которые представляют собой гидроциклон с расположенным по центру крупногабаритным картриджем. В «Урагане» сочетается удаление крупных взвесей за счет центробежных сил и последующая макрофильтрационная доочистка. Один фильтр такого типа

позволяет очистить до 130 м<sup>3</sup>/ч. Предварительная очистка воды не требуется. Из фильтра постоянно удаляются крупные загрязнения в виде шлама, а мелкие задерживаются картриджем. Картридж может быть регенерирован отмывкой водой вне фильтра.

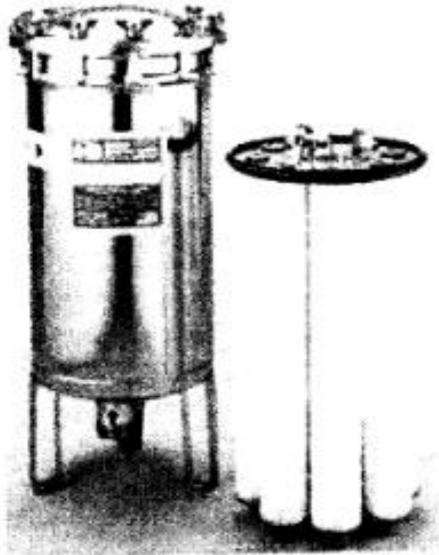


Рис. 2.15. Многопатронный фильтр

Поскольку размер отверстий относительно велик, то сопротивление таких мембран незначительно. Потери давления составляют, как правило, не более 0,1–0,2 МПа. Производительность пропорциональна приложенному давлению. По мере загрязнения перепад давления увеличивается, и это сигнализирует о необходимости замены картриджа. Чем мельче отверстия в мембране, тем быстрее она забивается (рис. 2.16) [92].

Естественно, что для увеличения срока службы таких фильтров, желательно предварительно удалять основную массу крупных взвесей, например, на регенерируемых засыпных фильтрах.

В некоторых случаях, при малых расходах воды, например, в котеджах, экономичнее чаще менять картриджи, чем устанавливать дорогие засыпные фильтры.

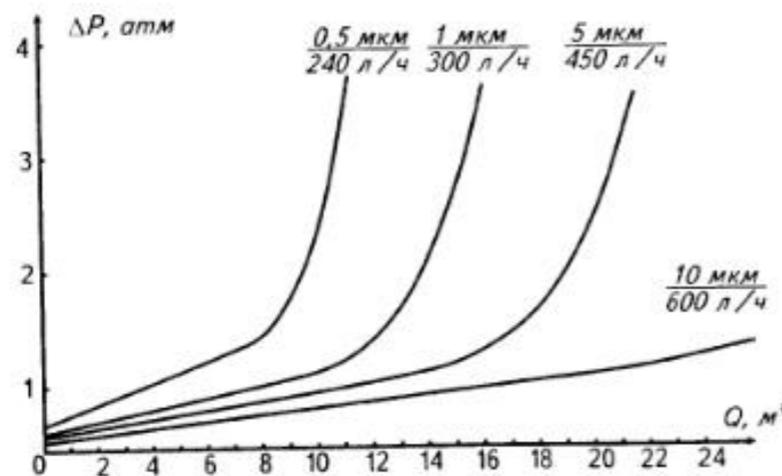


Рис. 2.16. Зависимость количества воды, очищенной на одном патроне серии ЭФМ, от размера его пор

### 2.1.3.6. Фильтрация с регенерацией мембраны обратным током очищенной воды

В фильтрах такого типа, предназначенных для макрофильтрации, используются нержавеющие или пластиковые сетки различного вида с размером отверстий 10–100 мкм. Они часто применяются для предварительной, контрольной фильтрации от грубодисперсных примесей типа песка для защиты насосов, сантехнического и др. оборудования. При забивании отверстий сетки она регенерируется обратным током жидкости. Это осуществляется путем ручного переключения кранов на входе и выходе воды в фильтр либо использованием многоходовых кранов с ручным или автоматическим приводом. Гидравлическое сопротивление таких фильтров невелико – до 0,2–1,0 атм, а удельная производительность очень велика – до 100 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч.

В качестве сетчатых фильтров в настоящее время предлагается большая номенклатура фильтров с ручной или автоматической регенерацией фирмы Honeywell (Германия) и аналогичных по устройству, но отличающихся дизайном, фирм Judo, BWT, SYR, AQUA и др. (рис. 2.17). Типичная производительность таких бытовых фильтров составляет несколько м<sup>3</sup>/ч, достигая для специальных промышленных образцов 10–50 м<sup>3</sup>/ч.

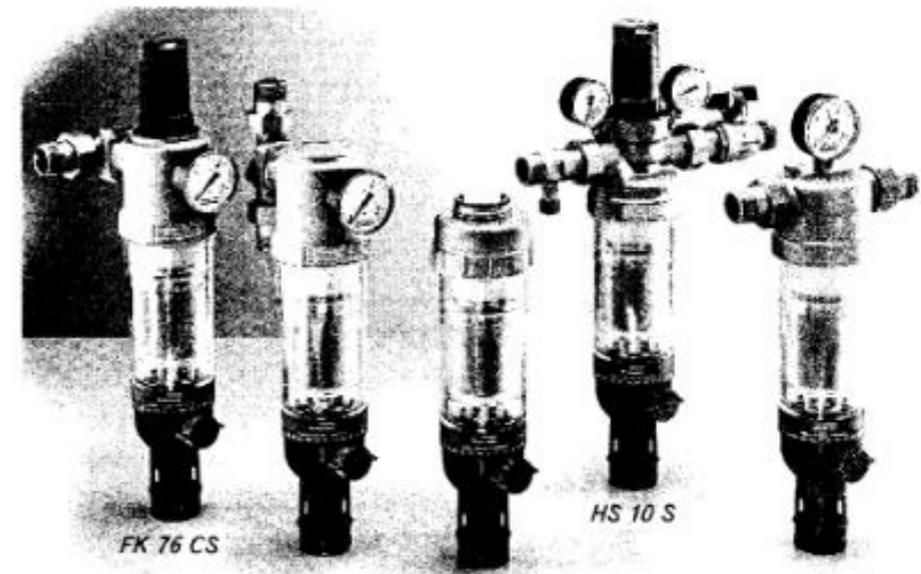


Рис. 2.17. Промывные сетчатые фильтры фирмы Honeywell

Основной недостаток таких фильтров – невозможность их применения для фильтрации вод, содержащих глинистые или другие липкие включения, например, гидроокись железа. Загрязненная ими сетка плохо регенерируется даже при использовании специальных внутренних щеток-очистителей, которые скользят по поверхности сетки при каждой регенерации.

В последнее время появились фильтры дискового типа «ARKAL», в которых очищаемая вода фильтруется через зазоры между установленными на оси многочисленными дисками со специальной насечкой (рис. 2.18) [134]. В зависимости от взаимного расположения дисков ширина зазора может составлять от 7 до 400 мкм. Согласно рекламным материалам фирмы единичная производительность составляет от 3 до 50 м<sup>3</sup>/ч. При регенерации обратным потоком жидкости диски раздвигаются и отмываются изнутри направленными струями воды, что способствует более глубокой очистке фильтрующих зазоров. Площадь фильтрации в такой конструкции оказывается меньше, чем у сетчатой. К сожалению, реального отечественного сравнительного опыта применения таких фильтров нет.

Разработаны фильтры с фильтрующими элементами в виде навитой пружины. Щель между витками проволоки является рабочим зазором. Такая щель забивается значительно меньше, чем ячейки в сетке. При регенерации обратным током витки пружины разжимаются и грязь из зазора эффективно удаляется.

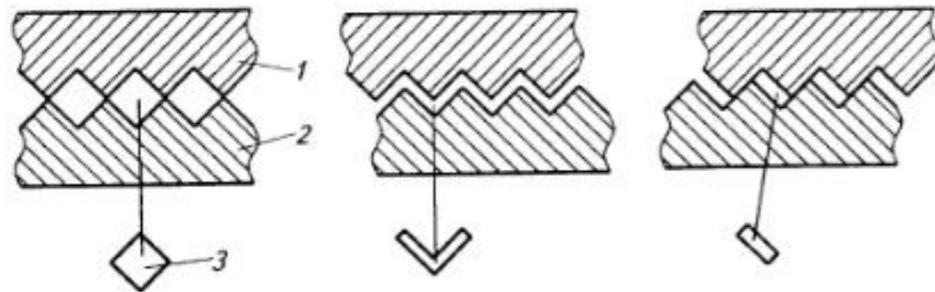


Рис. 2.18. Варианты геометрии фильтрующей решетки в промывных фильтрах фирмы «ARKAL»:

1, 2 – диски с насечкой; 3 – фильтрующие щели

Для микро- и ультрафильтрации используются фильтры из керамических, металлокерамических, стекло- и графитопластиковых трубок без или со специальным разделительным слоем. Фильтрация проводится с наружной поверхности трубок, а фильтрат выводится из ее внутренней полости. При загрязнении поверхности трубок они промываются обратным током очищенного раствора. Поскольку размер отверстий в таких мембранах составляет 0,01–1,0 мкм, а их количество на единицу площади не велико, то сопротивление таких фильтров значительно выше, чем у предыдущих, а удельная производительность ниже. Соответственно для обеспечения заданной производительности необходимо иметь большие поверхности фильтрации.

Новым направлением развития мембран, регенерируемых обратным током фильтрата, являются разработанные компанией «Hydranau-

tics» микро- и ультрафильтрационные полволоконные и рулонные элементы [104–107]. В основном элементы такого типа используются для УФ, обратного осмоса и нанофильтрации при работе с тангенциальным движением раствора. Подробно они будут рассмотрены ниже в соответствующем разделе.

Для процессов микро- и ультрафильтрации предложены специальные элементы на полых волокнах. Полые волокна представляют собой микроскопические трубки с анизотропной структурой, имеющие по сравнению с другими современными мембранами толстый разделительный слой и соответственно низкую удельную производительность. Однако из-за очень большой общей поверхности фильтрации в объеме единичного модуля его производительность велика.

Элемент из полых волокон представляет собой полностью готовый легко заменяемый блок, в котором тысячи полых волокон расположены параллельно его оси, и их концы загерметизированы так, что все наружные поверхности капилляров выходят в общий закрытый объем, по оси которого расположен перфорированный штуцер вывода пермеата (рис. 2.19). Все внутренние полости трубок гидравлически соединяются в концевых частях модуля, в которых расположены штуцера подвода очищаемой воды и вывода концентрата.

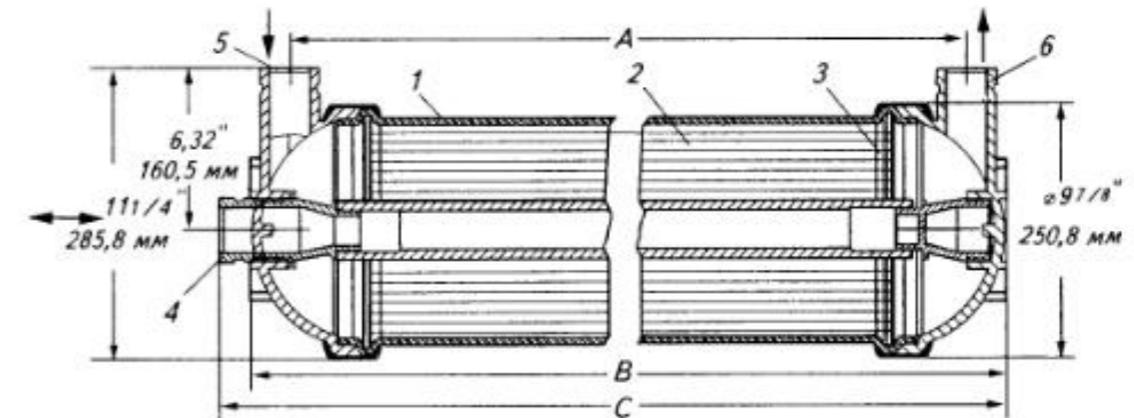


Рис. 2.19. Элемент из полых волокон для тупиковой фильтрации и регенерации обратным током:

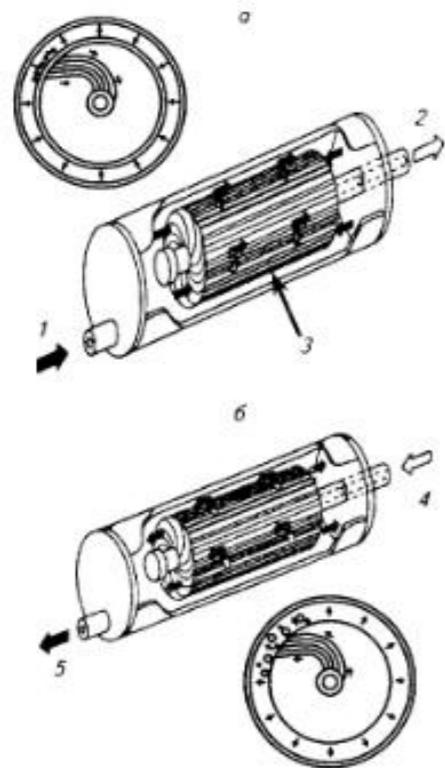
1 – корпус; 2 – полые волокна; 3 – герметичная заливка; 4 – пермеат; 5 – подача воды; 6 – вывод загрязнений

По сравнению со стандартным для процессов с тангенциальной фильтрацией МФ и УФ и обратного осмоса диаметр полых волокон, изготовленных из гидрофильного полисульфона, увеличен: внешний – 2,0, внутренний – 1,2 мм. В результате рабочая поверхность существенно уменьшилась, но появилась возможность фильтрации воды, содержащей взвеси, и удаления загрязнений при обратной промывке. В модуле

«HYDRAsar» с корпусом диаметром 225 мм и длиной 40 или 60 дюймов размещено около 2000 полых волокон с общей площадью 19 (или 30) м<sup>2</sup> [104].

Очищаемый раствор подается через концевую камеру внутрь всех трубок и пропускается в течение некоторого времени обычно, для речной воды 20–30 минут под давлением 1,5–4,0 атм. Затем следует интенсивная обратная промывка путем подачи пермеата в течение 20–30 секунд при давлении 2–3 атм. Загрязнения с внутренней поверхности трубок собираются в концевую камеру с другой стороны модуля и удаляются в сборник.

Из описанных элементов собираются серийные компактные установки с числом модулей от 6 до 162, имеющие производительность до 625 м<sup>3</sup>/ч [104–107].



**Рис. 2.20.** Ультрафильтрационный элемент для тупиковой фильтрации и регенерации обратным током:

*а* – рабочий режим; *б* – регенерация; 1 – исходная вода; 2 – фильтрат; 3 – рулонный элемент; 4 – сброс концентрата; 5 – обратная промывка фильтратом

Рулонный микро- и ультрафильтрационный элемент близок по конструкции к описываемому ниже элементу с тангенциальной фильтрацией. Принципиальным отличием от него является то, что вместо длинной мембраны, соединенной с центральным коллектором одним концом, имеется множество относительно коротких «язычков» или «звездочек», каждая из которых соединена с коллектором (рис. 2.20). Это обеспечивает возможность удаления накопленных осадков при обратной промывке. Режим работы аналогичен режиму работы полволоконного элемента.

Мембраны этих двух типов прошли испытания при очистке речной воды без предварительной подготовки и показали хорошие результаты по удалению мутности (взвешенные вещества, микроорганизмы), цветности, бактерий, вирусов, а также железа. Выход фильтрата составил, по разным данным, от 83 до 95% [104–107].

### 2.1.3.7. Тангенциальная фильтрация

Мембраны с каналами размером менее 0,1 мкм для удаления мельчайших частиц, от крупных органических молекул до ионов растворенных веществ, имеют незначительное проходное сечение, относительно высокое гидравлическое сопротивление, и поэтому для обеспечения заданной производительности требуются большие площади фильтрации. В результате их стоимость на единицу производительности оказывается высокой. Кроме экономических ограничений существуют и технологические, исключающие применение таких мембран в «тупиковом» режиме. Прежде всего это концентрационная поляризация мембран, т. е. накопление на их поверхности слоя задержанных молекул и частиц взвесей. По получаемому эффекту она близка к забиванию отверстий взвесью. Когда на поверхности мембраны концентрация извлеченных веществ (загрязнений) оказывается значительно больше, чем в очищаемом растворе, то за счет осмотического эффекта скорость фильтрации уменьшается.

Для устранения этих противоречий используются системы с постоянным интенсивным движением раствора вдоль поверхности мембраны – т. н. «тангенциальная фильтрация». При этом концентрат извлеченных веществ постоянно удаляется из аппарата (рис. 2.11, б). Скорость движения раствора вдоль мембраны должна обеспечивать турбулентный режим движения и обычно составляет не менее 2 м/ч. В этих условиях при однократном проходе вдоль мембраны в фильтрат, называемый **пермеатом**, переходит не более 20% воды с частицами меньшими, чем размер пор мембраны. Для уменьшения объема концентрата используется ряд приемов, которые различаются для микро- и ультрафильтрации, и нанофильтрации и обратного осмоса.

Аппаратурное оформление установок МФ, УФ, НФ и ОО близко друг к другу и отличается прежде всего типом применяемых мембран и рабочим давлением исходного раствора.

В зависимости от вида используемых мембран различают основные виды мембранных аппаратов:

- пленки и пластины ⇒ плоскорамные;
- трубки ⇒ трубчатые;
- свернутые пленки ⇒ рулонные;
- полое волокно ⇒ полволоконные.

Для каждого из этих типов имеется своя оптимальная область применения.

**Полимерные пленки и металлокерамические пластины** без или с разделительным слоем широко используются для мембранных процессов от МФ до ОО для плоскорамных и дисковых аппаратов. Поли-

мерные пленки также применяются в рулонных модулях (см. ниже), предназначенных для тех же процессов.

Наибольший прогресс достигнут в технологии изготовления плоских полупроницаемых мембран. Он основан на переходе сначала от изотропных (гомогенных, симметричных), т. е. имеющих поры, равномерные по толщине пленки, к анизотропным (асимметричным) мембранам, имеющим тонкий фильтрующий (разделяющий) слой и относительно толстую основу, а затем к композиционным многослойным мембранам. Последние представляют собой относительно крупнопористую полотно-подложку (целлюлозную, полисульфоновую и т. п.) с нанесенным на нее очень тонким фильтрующим слоем. Благодаря этому удалось резко снизить рабочее давление, необходимое для процесса разделения. За счет малой толщины разделяющего слоя эти мембраны имеют высокую удельную производительность. Их селективность также существенно выше, чем у анизотропных, поскольку новые технологии позволяют выполнить такие пленки с порами практически одинакового размера. Возможен подбор материалов, как подложки, так и разделяющего слоя, стабильных в различных химических средах.

Современные композиционные тонкослойные низконапорные мембраны имеют следующую структуру: на крупнопористую армирующую подложку нанесена ультрафильтрационная мембрана, которая включает тонкопористый промежуточный транспортный слой толщиной около 1 мкм. На этот слой нанесен ультратонкий (толщиной около 0,03 мкм) разделительный слой, который покрыт протекторным слоем. Такие мембраны являются композиционными с ярко выраженной анизотропностью. Каждый из слоев выполняет свою функцию – основа выдерживает механические нагрузки, а слой с высокой пористостью – каждый поддерживает следующий слой с еще меньшим размером пор.

Для ультрафильтрации наиболее распространены двухслойные мембраны.

Для обратного осмоса – трех- и более слойные.

Благодаря оптимизации конструкции мембран и уменьшению толщины селективного слоя удалось создать мембраны для нанофильтрации, низконапорного и сверхнизконапорного осмоса.

Нанофильтрационные мембраны имеют очень низкую селективность к однозарядным  $\text{Na}^+$ -катионам. Они работают при давлении от 0,2 до 1,6 МПа (2–16 атм), но задерживают только катионы солей жесткости (селективность 40–80%) и более тяжелых металлов (таблица 2.7) [104, 110, 111, 114–122].

Мембраны для низконапорного осмоса работают при давлении 1–2 МПа (10–20 атм). Их селективность к однозарядным  $\text{Na}^+$ -катионам достаточно высока – до 99%, и они обеспечивают получение обессоленной воды высокого качества (таблица 2.7) [104, 110, 111, 113–133].

Мембраны для сверхнизконапорного осмоса обеспечивают проведение достаточно эффективного разделения ионов при давлении воды от 2–3 атм и широко применяются в бытовых устройствах.

Другим большим достижением стала разработка малозагрязняемых мембран. Обычные композитные мембраны выполняются из ароматических полиамидов и сильно гидрофобны. В результате они смачиваются органическими соединениями, и к ним прилипают загрязнения. Новые мембраны типа LFC характеризуются низким поверхностным потенциалом и гидрофильной поверхностью. Поэтому их удельная производительность мало зависит от заряда ионов, и поверхность меньше загрязняется. Так, при очистке воды за 2000 часов для поддержания удельной производительности на уровне 17 л/м<sup>2</sup>ч на обычной мембране пришлось увеличить давление с 5 до 11 атм, а на LFC при 5–6 атм сохранилась производительность 21 л/м<sup>2</sup>ч. При этом селективность составила 99,6% [104].

Основными материалами для изготовления плоских мембран являются: ацетаты целлюлозы (АЦ), полисульфонамид (ПС), фторопласты, поливинилиденфторид (ПВДФ), полиэтилентерефталат (ПЭТФ), полиакрилонитрил (ПАН), и еще несколько десятков полимеров, применяющихся для создания различных элементов современных мембран.

**Ацетаты целлюлозы (АЦ).** Это первый материал, из которого начали изготавливать мембраны для всех процессов. Он отличается низкой стоимостью и относительно высокой стойкостью к действию свободного активного хлора. Мембраны из АЦ гидрофильны и характеризуются низкой загрязняемостью.

Основными недостатками таких мембран являются низкая химическая и биологическая стойкость, а также высокое рабочее давление и низкая селективность. Рабочий диапазон рН составляет от 4 до 8. При кратковременных химических промывках могут быть использованы растворы с рН от 3 до 9 (рис. 2.21). Температура раствора не должна превышать 35 °С. Микроорганизмы способны питаться материалом мембраны и прорасти через нее, нарушая структуру и размер отверстий. В результате селективность мембран падает.

Технология изготовления АЦ мембран не может обеспечить равномерность размеров пор и малую толщину разделительного слоя. Поэтому их селективность невелика, но необходимо высокое рабочее давление около 5 МПа (50 атм), что приводит к большим энергозатратам. Вследствие указанных причин использование АЦ мембран, особенно в обратном осмосе, сокращается, и в настоящее время их доля на мировом рынке не превышает 5%.

Применение ацетатцеллюлозных мембран оправдано в установках водоподготовки, когда обрабатывается хлорированная вода и есть необходимость сохранить этот хлор в очищенной воде.

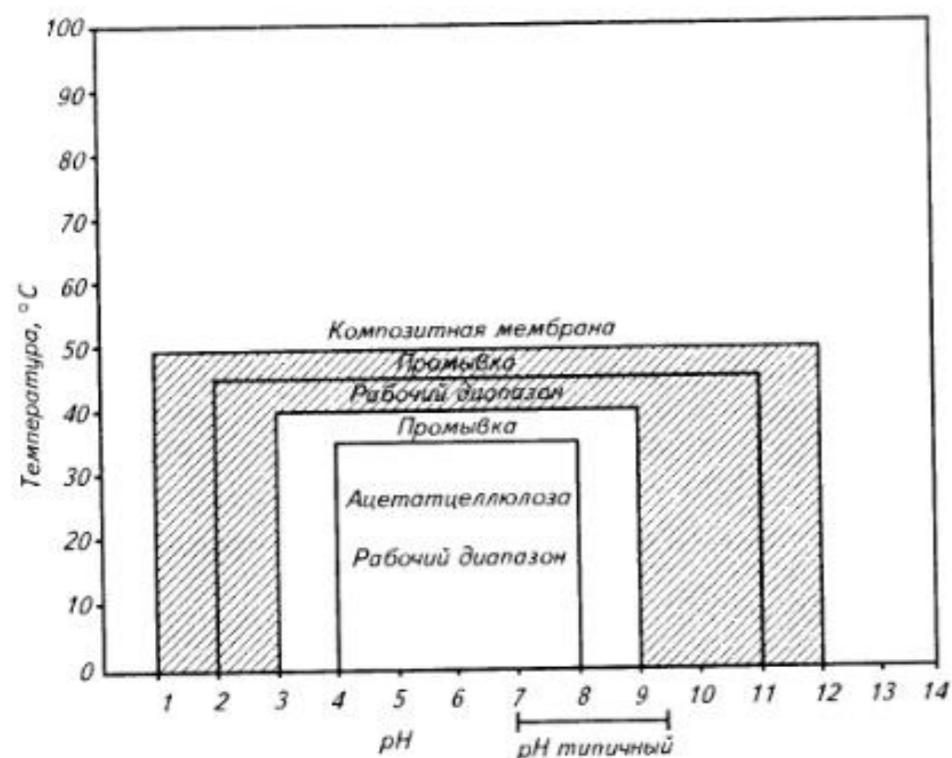


Рис. 2.21. Сравнение диапазона pH, допустимого для работы и кратковременных химических промывок, для композиционных и ацетатцеллюлозных мембран

Все современные мембраны – **композиционные** и состоят из нескольких слоев, выполненных из различных материалов. Эффективность разделения и производительность обеспечивается разделительным слоем, а их химическая и температурная стойкость – всеми использованными материалами.

Так, **полисульфоновые** (ПС) мембраны на основе ароматического полисульфонамида изготавливаются на подложке из лавсановой или полипропиленовой бумаги. Полисульфон химически стоек, рабочий диапазон pH составляет 2–12 (рис. 2.21). Он имеет хорошую температурную стабильность до 100 °C. Используется самостоятельно в мембранах для МФ и УФ, а в композитных для обратного осмоса – как материал подложки.

Стойкость материалов, применяемых для производства мембран, в различных средах показана в таблице 2.8.

Отечественная промышленность – «Владипор» [93] – в основном выпускает мембраны из ацетатов целлюлозы типа МГА, которые способны работать при pH 5–8; МГЭ (на основе этилцеллюлозы), имеющие диапазон pH 1–12, и МГП (на основе ароматических полиамидов) с диапазоном pH 1–12 и рабочей температурой до 150 °C. Рабочее давление

для таких мембран 4–5 МПа (40–50 атм). Они имеют высокую селективность как к многозарядным, так и к однозарядным –  $\text{Na}^+$ -катионам.

## 2.8. Химическая стойкость мембран из различных материалов

Материал мембраны	Композитная	АЦ	ПС	ПВДФ	ПАН	Керамика	Целлюлоза
$3 < \text{pH} < 8$	+	+	+	+	+	+	+
$\text{pH} < 3$ или $> 8$	+	-	+	+	+	+	-
$T > 35$ °C	+	-	+	+	+	+	+
Протеины	+	(+)	+	(+)	(+)	+	+
Полисахариды	(+)	-	+	-	(+)	+	-
Алифатические углеводороды	-	-	-	(+)	+	+	+
Ароматические углеводороды	-	-	-	+	-	+	(+)
Окислители	-	(+)	+	+	(+)	+	(+)
Кетоны	-	-	-	+	-	+	(+)
Спирты	+	-	+	+	+	+	+

+ – устойчив; (+) – относительно устойчив; – – неустойчив

Листовые мембраны непосредственно используются в аппаратах нескольких типов. Кроме того, из них изготавливают рулонные элементы (см. ниже).

**Плоскорамные аппараты** типа фильтр-пресса [4, 8, 16–18, 104, 110–112], являющиеся первым образцом мембранных аппаратов, представляют собой пакет мембранных элементов, разделенных фигурными резиновыми прокладками, которые зажаты между двумя плитами стяжными болтами (рис. 2.22). Мембранный элемент прямоугольной формы имеет на обеих своих поверхностях сеть специальных дренажных каналов, прорези для укладки мембраны и отверстия для прохождения исходного раствора и концентрата, а также боковые штуцера сбора и вывода пермеата. Дренажные каналы покрываются специальным пористым материалом, тканью. Мембрана покрывает мембранный элемент с обеих сторон так, что ее разделительный слой находится снаружи. Между соседними мембранными элементами устанавливаются эластичные прокладки с системой каналов, обеспечивающих турбулизацию потока воды.

Очищаемый раствор подается через штуцер в отверстие в плите и проходит по каналам, образованным совмещенными отверстиями в мембранных элементах и прокладках, равномерно вводясь в каждое межэлементное пространство, ширина которого определяется толщиной прокладок. Раствор движется параллельными потоками одновременно вдоль всех мембран. Проходя вдоль мембраны, часть раствора фильтрует-

ся внутрь мембранного пакета и с помощью дренажных каналов собирается и выводится с горца мембранного элемента. От каждого элемента трубочками пермеат отводится в прозрачный стакан-сборник. При разрушении единичной мембраны по помутнению пермеата из данной ячейки можно определить место неисправности и провести замену только аварийной мембраны. Концентрат собирается со стороны мембранного элемента, противоположного подаче, и через каналы в модулях и прокладках собирается и выводится через штуцер на стяжной плите.

На рис. 2.22 представлен мембранный аппарат А1-ОУС, разработанный НПО «Продмаш» и использующийся для различных процессов ультрафильтрации. Он представляет собой пакет из 53 мембранных элементов, зажатых шпильками между верхней и нижней плитами.

Такой модуль имеет рабочую площадь фильтрации около  $7,5 \text{ м}^2$ , что обеспечивает производительность при УФ до  $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Его размеры составляют  $600 \times 400 \times 500 \text{ мм}$  при массе 60 кг.

В межмембранном пространстве толщиной 2–3 мм легко обеспечивается заданная высокая скорость движения раствора вдоль мембраны.

В таких аппаратах используются наиболее простые и дешевые мембраны в виде пленки. Они относительно легко заменяются. Большое расстояние между мембранами позволяет перерабатывать наиболее загрязненные по сравнению с другими мембранными аппаратами растворы. Однако плотность размещения мембран в единице объема наименьшая из всех вариантов. Большая металлоемкость, которая резко возрастает с ростом рабочего давления, ограничивает их применение в ультрафильтрации. К недостаткам такого аппарата также следует отнести неравномерную усадку мембран по высоте, большое количество уплотняемых стыков и возможность протечек разделяемого раствора.

Новой конструкцией аппарата с плоскими мембранами, сочетающей преимущества плоскорамных (возможность переработки загрязненных растворов и возможность замены единичной бракованной мембраны) и ролонных элементов (высокая плотность упаковки мембран и легкость их замены) является **диско-трубчатый аппарат ДТ** разработки фирмы «Rochet». Он предназначен для ультрафильтрации и обратного осмоса [112].

Мембранный элемент ДТ представляет собой 8-гранную подушку из двух плоских полимерных мембран с необходимой пористостью, сваренную по торцам ультразвуком, между которыми расположен дренажный материал (рис. 2.23). Такие элементы набирают в пакет на центральной стяжной перфорированной шпильке, служащей для отвода пермеата. Расстояние между элементами определяется пористой вставкой.

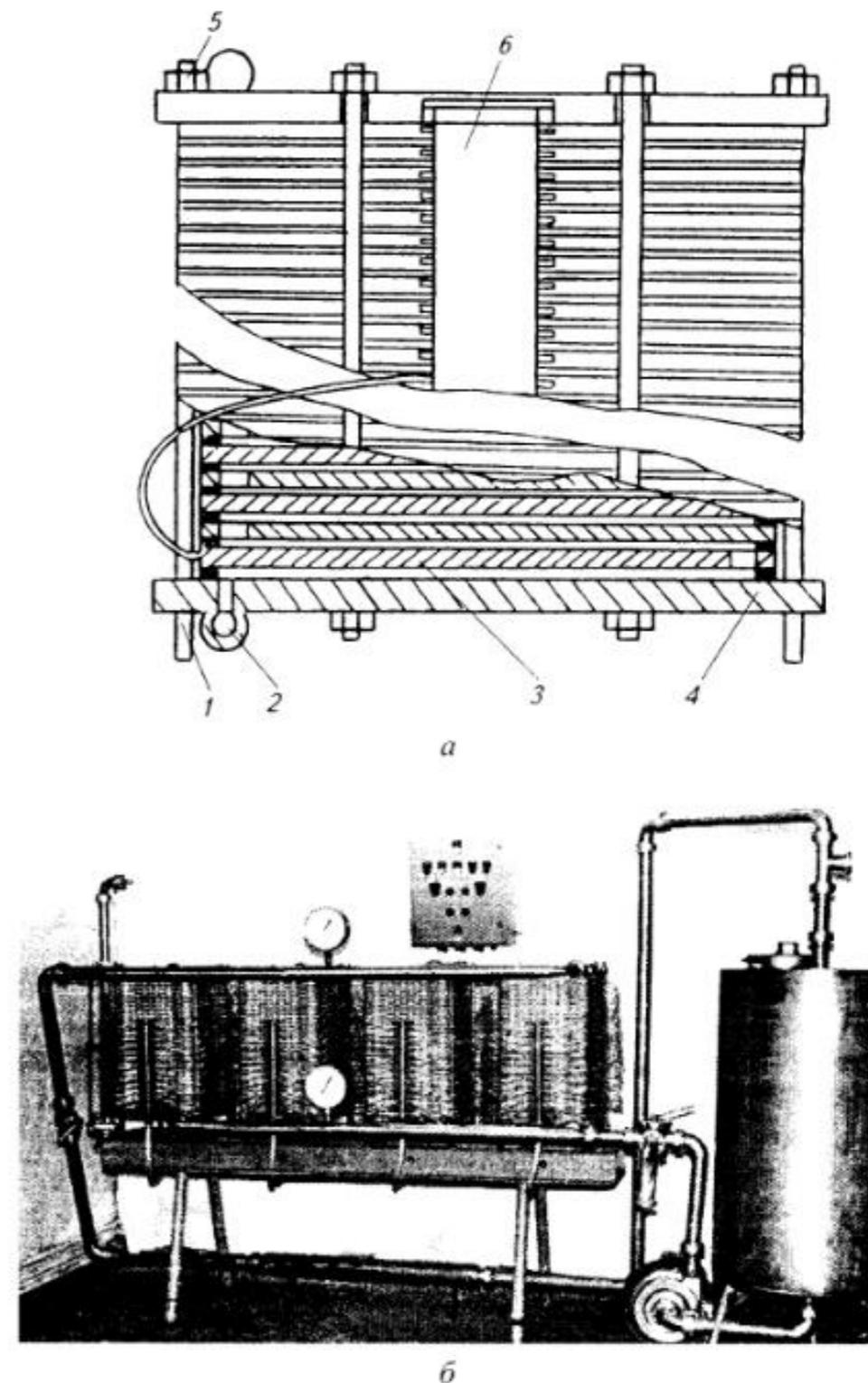


Рис. 2.22. Схема плоскорамного аппарата типа фильтр-пресса (а) и вид установки с такими модулями (б):

1 – фланец; 2 – штуцер исходного раствора; 3 – мембранный элемент; 4 – прокладка; 5 – стяжная шпилька; 6 – коллектор фильтра

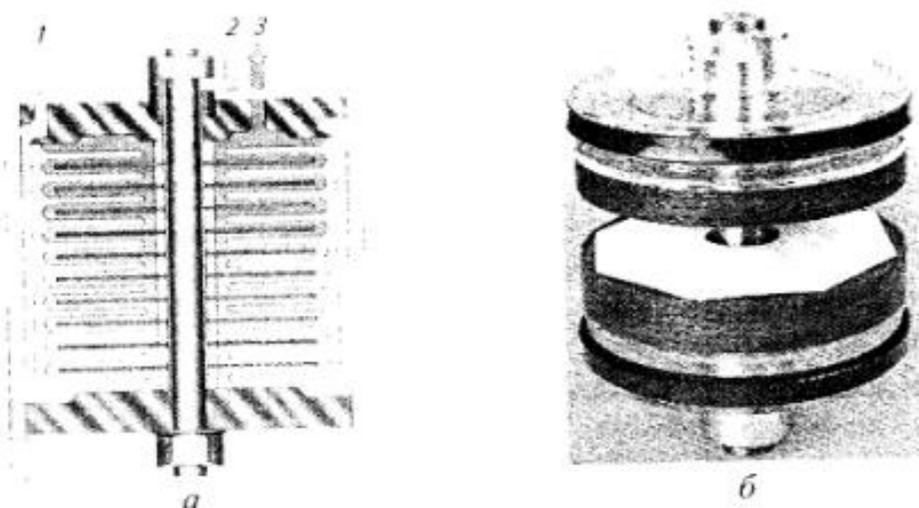


Рис. 2.23. Схема аппарата (а) и мембранный элемент (б) ДТ фирмы «Rochem»:

1 – исходный раствор; 2 – пермеат; 3 – концентрат

Элементы в сборе устанавливаются в корпус, как правило, диаметром 8", представляющий собой трубу со съемными заглушками, через штуцера на которых подаются и выводятся раствор, пермеат и концентрат. Рабочее давление воспринимается только корпусом.

Такая конструкция обеспечивает высокую плотность упаковки мембран, легкость замены всего блока и возможность замены единичного бракованного элемента. Короткий путь жидкости вдоль каждой мембраны, равный  $\frac{1}{2}$  диаметра корпуса, позволяет перерабатывать более загрязненные растворы, чем в рулонных аппаратах.

Установки с элементами такого типа применяются для ультрафильтрации и обратного осмоса с давлением до 200 атм для опреснения морской воды на кораблях ВМС США. По утверждению фирмы «Rochem», такие установки имеют преимущество перед рулонными и полволоконными по возможности переработки загрязненных растворов и продолжительности работы мембран до замены. Их недостатком является существенно большая стоимость.

Металлокерамическая мембрана представляет собой пористую пластину из нержавеющей стали, полученную методом порошковой металлургии, которая покрыта ультратонким разделительным слоем из пористой оксидной керамики. Такие мембраны типа «Трумем» выпускаются ГУП НПЦ «Ультрам». Уникальное покрытие из ультрадисперсной нанокерамики обладает свойством пластичности. Поэтому такие мембраны могут изготавливаться на тонкой гибкой подложке с очень тонким разделительным слоем, не более 10 мкм, сохраняющим целостность при деформациях. Это свойство мембран обуславливает их высокую удельную производительность, в несколько раз превышающую

производительность традиционных керамических мембран. При этом они имеют очень высокую механическую прочность и химическую стойкость. Из-за сложности получения пор с размером менее 0,1 мкм они предназначены только для микрофильтрации.

Металлокерамические мембраны могут использоваться в плоскорамных аппаратах обычной конструкции или же в специально разработанных для их оптимального применения. Поскольку мембраны «Трумем» имеют высокую удельную производительность, то для снижения концентрационной поляризации и обеспечения их максимальной эффективности необходимо интенсифицировать перемешивание в примембранном слое. Это выполняется специальными вращающимися турбулизаторами, расположенными в межмембранных пространствах (рис. 2.24) [102, 103].

#### Трубчатые мембраны для МФ и УФ

Трубчатые аппараты являются «по возрасту» вторым устройством мембранного разделения.

Трубчатые элементы представляют собой трубки из пористой керамики, металла, стекло- и графитопластика.

Керамические элементы могут быть в виде тонкослойной трубки или фигурного изделия с многочисленными продольными каналами (рис. 2.25), что увеличивает площадь фильтрации. Для удаления мелких частиц при УФ на внутреннюю поверхность трубок наносится разделительный слой. Достоинствами керамических мембран являются высокая химическая, температурная и микробная стойкость. Они допускают работу и регенерацию с агрессивными реагентами и при высоких температурах. Однако они имеют очень существенные недостатки, прежде всего это хрупкость, которая усложняет конструкцию мембранного аппарата и заставляет изготавливать мембраны толстостенными. Последнее резко снижает их удельную производительность, которая в 2–3 раза ниже, чем у полимерных.

РХТУ им. Д. И. Менделеева разработал и выпускает керамические элементы для МФ с 1, 7 и 19 каналами [99–101]. Их характеристики приведены ниже (табл. 2.9).

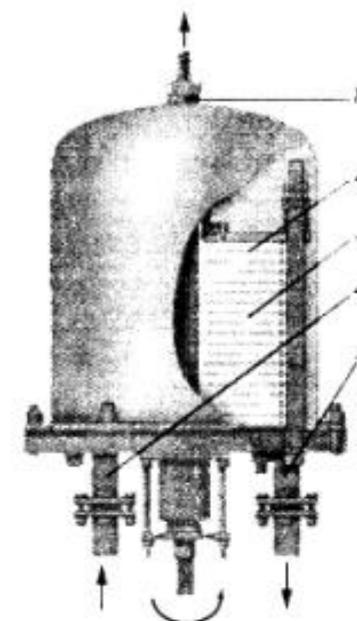


Рис. 2.24. Аппарат с металлокерамическими мембранами «Трумем»:

1 – вывод концентрата; 2 – мембрана; 3 – вращающийся турбулизатор; 4 – ввод раствора; 5 – вывод пермеата

### 2.9. Технические характеристики керамических элементов

Параметр	1-канальный	7-канальный	19-канальный
Площадь фильтрации, м <sup>2</sup>	0,012	0,1	0,2
Длина, мм	850	840	840
Удельная производительность по дистилляту, л/м <sup>2</sup> ·ч	600–1000	500–900	500–800
Размер пор селективного слоя, мкм	0,2–0,4	1,0–2,5	1,0–2,5
Размер пор подложки, мкм	4–6	10–15	10–15
Материал	альфа-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
Пористость	35–45%		
Термостойкость	до 400 °С		
Химическая стойкость	во всем диапазоне pH		

Мембранный элемент из стекло- или графитопласти представляет собой пористую трубку, на внутреннюю поверхность которой нанесена разделительная мембрана.

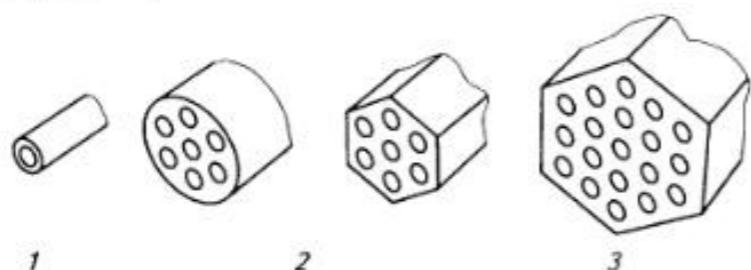


Рис. 2.25. Керамические элементы могут быть в виде тонкостенной трубки (1) или фигурного изделия с 7 или 19 продольными каналами (2, 3)

Аппарат с трубчатыми элементами представляет собой корпус в виде металлической или пластмассовой трубы со штуцерами вывода пермеата, внутри которой параллельно размещаются несколько прямых трубок, открытые концы которых герметично отделяются от корпуса. По концам корпуса располагаются камеры, гидравлически соединенные с внутренними полостями трубок. Схематично по устройству такие аппараты близки к половолоконным (рис. 2.19). Исходный раствор подается в концевую камеру, а из нее распределяется во внутрь трубок, проходит по ним и в виде концентрата выводится с противоположного конца модуля, а пермеат отводится снаружи из полости между трубчатым модулем и корпусом.

В стандартном элементе типа БТМ для микрофильтрации и БТУ для ультрафильтрации, выпускаемыми ЗАО «Владипор», соединены 7 трубок диаметром наружным 15 мм, внутренним 13 мм и длиной 2000 мм, кото-

рые вставляются в корпус-трубу внутренним диаметром 60 мм со штуцерами вывода пермеата. По торцам корпуса закрепляются концевые камеры. Очищаемая вода вводится во внутреннюю полость всех трубчатых элементов, а концентрат выводится с их противоположного конца. Пермеат удаляется из корпуса аппарата. Рабочая поверхность аппарата составляет около 0,5 м<sup>2</sup>. Для предотвращения забивания пор и снижения концентрационного эффекта необходимо обеспечивать высокую скорость раствора внутри трубок, на уровне 2–4 м/с. Для создания такой скорости и достаточного концентрирования модули включаются последовательно (рис. 2.26).

Достоинством этих аппаратов является возможность очистки растворов с большим количеством коллоидов, высокомолекулярных веществ, тонко- и грубодисперсных взвесей, вплоть до крупных, а также относительная легкость замены вышедших из строя модулей. Недостатком считается очень низкая удельная поверхность (плотность упаковки) мембран.

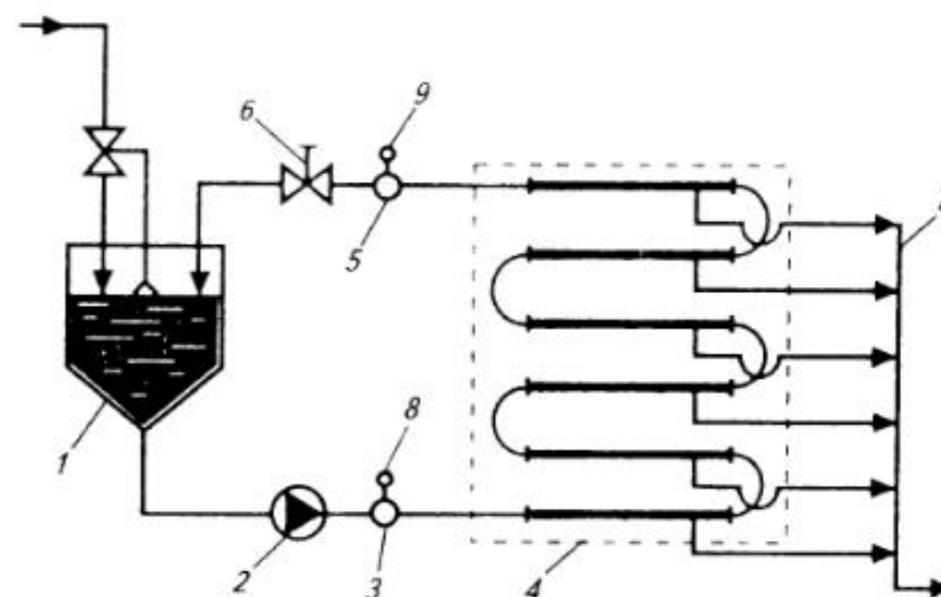


Рис. 2.26. Схема ультрафильтрационной установки с трубчатыми мембранами:

1 – бак; 2 – насос; 3, 5 – коллекторы; 4 – блок мембран; 6 – регулятор давления; 7 – коллектор фильтрата; 8, 9 – манометры

Трудность обеспечения высокой равномерности нанесения внутреннего покрытия в трубках и получения высокой селективности разделения обуславливает использование трубчатых элементов в основном для МФ и УФ.

В таблице 2.10 показаны основные характеристики трубчатых модулей для ультра- и микрофильтрации [93].

## 2.10. Основные характеристики трубчатых модулей для ультра- и микрофильтрации

### Трубчатые ультрафильтрационные модули типа БТУ

Материал мембран	Ацетат целлюлозы (АЦ)	Полисульфон (ПС)	Полисульфонамид (ПСА)	Полиамид (ПА 6,6)	Поливинилпирролидон (ПВН)	Фторопласт (Ф)
<i>Технические характеристики:</i>						
Приблизительная молекулярная масса задерживаемых веществ, кД	20	30	30	30	30	70
Проницаемость по обессоленной воде (при $P = 0,2$ МПа, $T = 25$ °С, после 1 часа испытаний), л/м <sup>2</sup> ·ч	150	300	600	450	300	700
<i>Рабочие характеристики:</i>						
Максимальное рабочее давление, МПа	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Рекомендуемое рабочее давление, МПа	для всех модулей 0,1–0,5					
pH	4–8	1–13	2–11	2–11	1–12	1–12
Рабочая температура, °С	0–30	0–80	0–60	0–40	0–60	0–60
Устойчивость к хлору при дезинфекции, мг/л	10	300	0	0	300	300
Рекомендуемая скорость потока над поверхностью мембран, м/с	4–5	4–5	4–5	4–5	4–5	4–5

### Трубчатые микрофильтрационные модули типа БТМ

Материал мембраны	Полисульфон (ПС)	Полисульфонамид (ПСА)	Фторопласт (Ф)	
<i>Технические характеристики:</i>				
Средний размер пор, мкм	0,2	0,45	0,2	0,6
Проницаемость по чистой воде после 5 часов испытаний при $P = 0,1$ МПа, $T = 25$ °С, л/м <sup>2</sup> ·ч	200	250	300	600
<i>Рабочие характеристики:</i>				
Рекомендуемое рабочее давление, МПа	0,1	0,1	0,1	0,1
Рекомендуемая скорость потока над поверхностью мембраны, более, м/с	2,5	2,5	2,5	2,5

### Половолоконные элементы для УФ, НФ и ОО [8, 16–18, 104]

Полое волокно представляет собой микроскопические трубки анизотропной структуры. Внутренний диаметр волокон 0,5–0,8, а внешний 1,0–1,2 мм. Главное отличие полых волокон от трубок состоит не столь-

ко в диаметре, сколько в отсутствии слоя, поддерживающего разделительную мембрану. В полом волокне функции разделительного слоя и подложки выполняет основной материал волокна достаточной толщины. В связи с этим их удельная производительность по сравнению с современными пленочными мембранами много меньше. Однако одновременное параллельное использование огромного количества таких волокон с большой площадью в небольшом объеме позволяет иметь достаточно высокую производительность на единицу объема оборудования.

Аппарат с мембранными элементами в виде полых волокон (рис. 2.27) представляет собой пластиковый корпус 4 со штуцерами, в который уложен пучок из тысяч полых волокон 5. Концы волокон с двух сторон загерметизированы так, что открытые торцы выходят в концевые камеры 8.

Фильтрация раствора производится либо внутрь волокон, либо наружу. Первый способ используется в обратном осмосе при высоком давлении, а второй в микро- и ультрафильтрации.

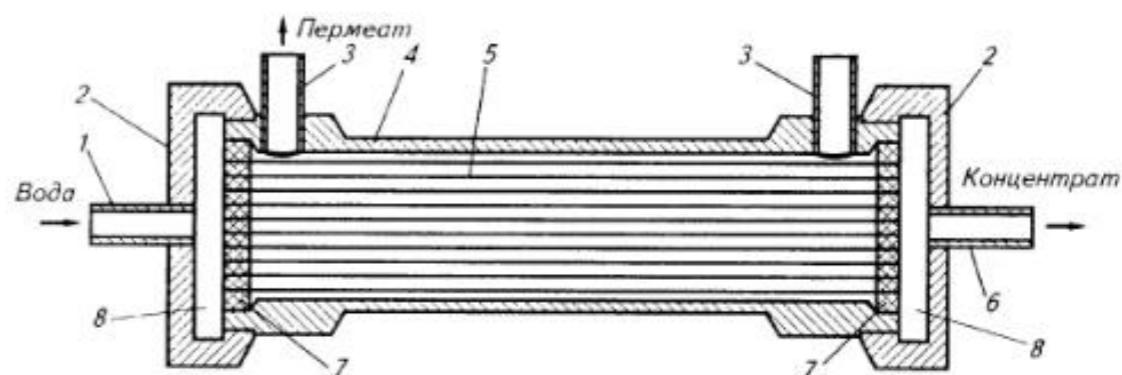


Рис. 2.27. Элемент с полыми волокнами:

1 – патрубок подачи воды; 2 – крышки; 3 – патрубок пермеата; 4 – корпус; 5 – полые волокна; 6 – патрубок концентрата; 7 – герметизирующая заливка; 8 – концевые камеры

При ультрафильтрации исходный раствор подается в концевую камеру, распределяется из нее во внутреннюю полость волокон и, двигаясь внутри них, фильтруется через пористые стенки. Фильтрат собирается внутри полости корпуса и отводится из него. Концентрат выводится с противоположной стороны модуля.

Стандартный УФ элемент из полых волокон, выпускаемый ГП ВНИИПВ, имеет размеры: диаметр 75 мм при длине 1040 мм. Его рабочая площадь фильтрации около 3,0–3,2 м<sup>2</sup>. Волокна выполнены из полисульфона. При давлении питающего раствора 2–4 атм его начальная производительность составляет 250–600 л/ч. Если корпус выполняется из полиметилметакрилата, то возможна работа при pH 2–12; если из поликарбоната, то при pH 2–8, а из АБС-пластика – pH 1–13. Рабочая

температура до 60 °С. Такой модуль позволяет очистить воду от частиц с молекулярной массой более 50000. Результаты по очистке природной воды представлены в таблице 2.11.

### 2.11. Эффективность очистки воды ультрафильтрацией на полых волокнах

Показатели качества воды	До очистки	После очистки
Цветность, град.	35–50	0–5
Мутность, мг/л	4–50	0
БПК, мг/л	8–18	3–7
Железо коллоидное, мг/л	2–4	0–0,5
Размер задерживаемых частиц, мкм	$10^6$ – $10^5$	удаляются полностью до $10^{-2}$

К достоинствам такого аппарата относится высокая плотность упаковки мембран, отсутствие металлических деталей и дренажных устройств, высокая скорость раствора, возможность быстрой замены вышедшего из строя модуля и относительная дешевизна.

Существенным недостатком полых волокон является невозможность организации турбулентного движения в столь тонких капиллярах, необходимого для снижения концентрационной поляризации и предотвращения отложения загрязнений. Поэтому они имеют повышенную склонность к забиванию и снижению производительности. Предварительная очистка исходного раствора от взвесей является необходимой.

#### Рулонные элементы для НФ и ОО

Отработанные «высокие» технологии склейки плоских мембран в рулоны с плотной их упаковкой привели к тому, что в настоящее время рулонные элементы являются наиболее эффективными по критерию эффективность/стоимость. Причем под эффективностью подразумевается удельная или объемная производительность при заданном давлении и степени разделения. Поэтому они наиболее распространены в процессах НФ и ОО.

В настоящее время идет активное их внедрение и в процессы УФ и МФ.

Рулонный элемент (рис. 2.28) представляет собой центральную перфорированную трубу 1, к которой герметично прикреплена внутренняя часть пакета, состоящая из двух склеенных между собой мембран 2, разделенных специальной дренажной прокладкой 3. Мембраны склеиваются селективным слоем наружу. Пакет мембран вместе с сеткой-сепаратором 4 свернут в тугую рулон и зафиксирован от разматывания.

При работе исходный раствор подается в торец корпуса аппарата и движется вдоль поверхности мембраны через сетку-сепаратор 4, которая необходима для поддержания оптимального расстояния между мем-

бранами и турбулизации движения раствора. Концентрат выводится с противоположного конца. Пермеат по дренажной прокладке 3, расположенной между мембранами, движется к центру элемента и выводится по фильтроотводной трубе 1.

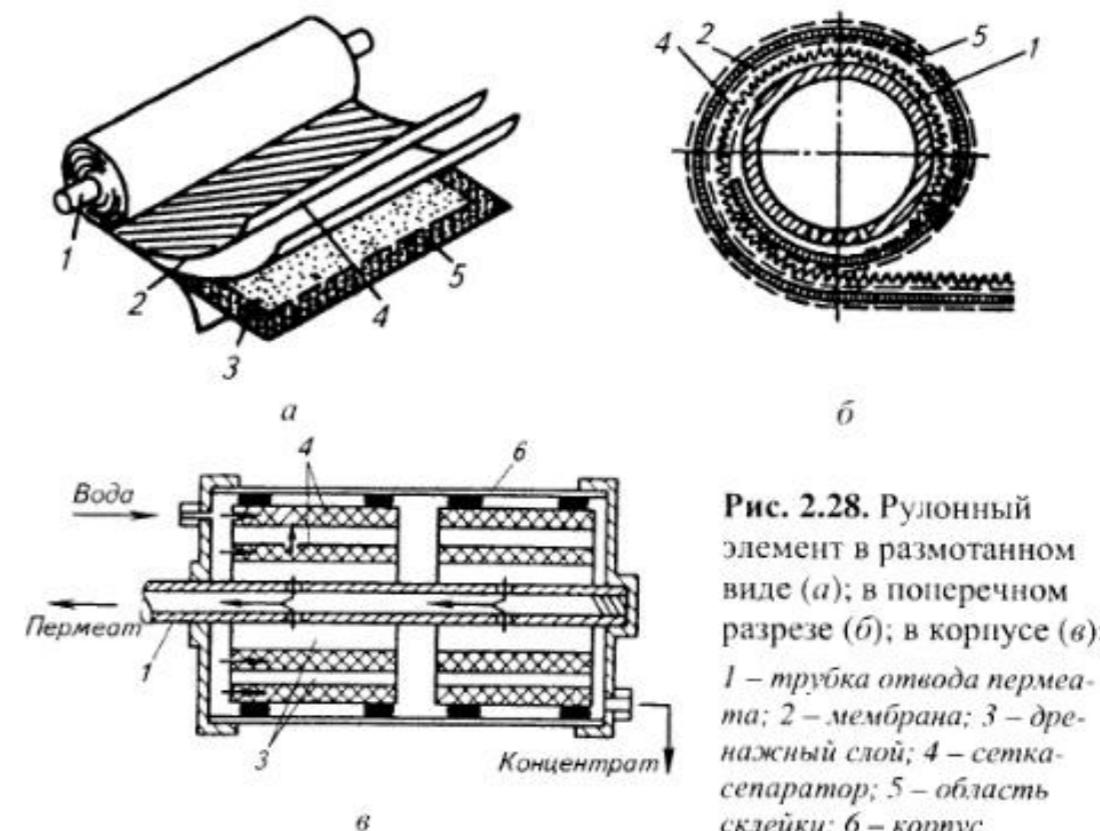
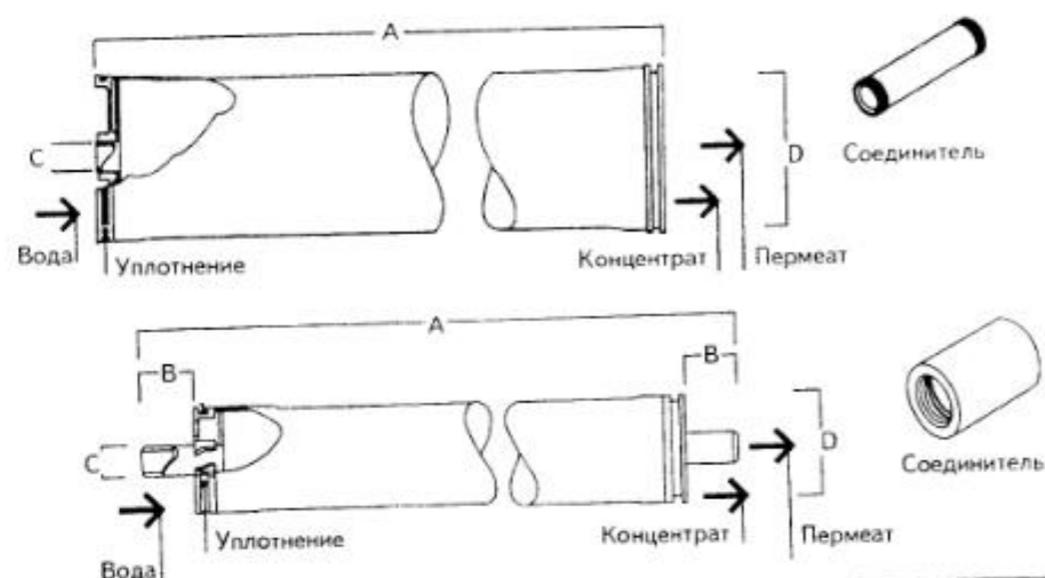


Рис. 2.28. Рулонный элемент в размотанном виде (а); в поперечном разрезе (б); в корпусе (в): 1 – трубка отвода пермеата; 2 – мембрана; 3 – дренажный слой; 4 – сетка-сепаратор; 5 – область склейки; 6 – корпус

Рулонные элементы производятся диаметром от 1,5 до 8 дюймов (в РФ от 45 до 200 мм) из листовых мембран, выполненных из различных материалов и описанных выше. Габариты стандартных элементов приведены на рисунке 2.29.

В зависимости от применяемых мембран рулонные элементы могут использоваться для любых процессов мембранного разделения. В России мембранные элементы производят ЗАО «Владипор» и ООО «ЭКОФИЛ». ЗАО «Владипор» производит элементы из мембран собственного производства, в основном на основе ацетатов целлюлозы. «ЭКОФИЛ» производит элементы из комплектующих зарубежных фирм. Сравнительные характеристики рулонных элементов этих производителей [122] и фирм «Filmtec» и «GM Osmonics» приведены в таблице 2.12.



Тип – диаметр, длина в дюймах	D – диаметр, мм	A – длина, мм	B – вылет штуцера, мм	C – диаметр соединительный, мм
2514	61	356	30	19
2521	61	533	30	19
2526	61	660	30	19
2540 (61–1016)*	61	1016	30	19
4014	99,4	256	27	19
4021	99,4	533	27	19
4025	99,4	635	27	19
4040 (100–1016)*	99,4	1016	27	19
8040 (200–1016)*	201	1016	–	29

\* обозначения отечественных элементов

Рис. 2.29. Габариты стандартных рулонных элементов

## 2.12. Сравнительные характеристики рулонных элементов

Производитель, тип элемента	Диаметр, мм	Длина, мм	Давление раб/макс, МПа	Производительность, л/ч	Селективность, %	Раствор. вещество	Макс. раб. темпер., °C	Рабочий диапазон pH	Стойкость к своб. хлору, мг/л, не более
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>ЗАО НТЦ «Владипор»</b>									
ЭРО-КН-200-1016	201	1016	1,6/2,0	1000	90	NaCl	45	2–11	0,01
ЭРО-КН-100-1016	99	1016	1,6/2,0	250	92	NaCl	45	2–11	0,01
ЭРО-96-950	96	950	5,0/5,6	180	92	NaCl	35	3–8	5

Продолжение таблицы 2.12.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЭРО-КМ-МО-100-1016	99	1016	5,0/5,6	90	97,5	NaCl	45	2–11	0,1
ЭРН-КП-200-1016	201	1016	1,6/2,0	2000	97	MgSO <sub>4</sub>	45	2–11	1
ЭРН-КП-100-1016	99	1016	1,6/2,0	400	97	MgSO <sub>4</sub>	45	2–11	1
ЭРУ-200-1016	201	1016	0,2/1,0	2000	–	–	55	2–11	10
ЭРУ-100-1016	99	1016	0,2/1,0	500	–	–	55	2–11	10

ООО «Экофил»

ЭМО-Н-200-1016	201	1016	1,0/4,1	1700	99,0	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМО-Н-100-1016	99	1016	1,0/4,1	400	99,0	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМО-Н-96-950	96	950	1,0/4,1	330	99,0	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМО-С-200-1016	201	1016	1,6/4,1	1500	99,5	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМО-С-100-1016	99	1016	1,6/4,1	350	99,5	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМО-М-200-1016	201	1016	5,5/6,9	650	99,5	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМО-М-100-1016	99	1016	5,5/6,9	150	99,5	NaCl	45	3–10	0,1
ЭМН-200-1016	201	1016	1,6/2,5	2000	97	MgSO <sub>4</sub> MgSO <sub>4</sub>	45	2–11	0,1
ЭМН-100-1016	99	1016	1,6/2,5	400	97	MgSO <sub>4</sub>	45	2–11	0,1
ЭМУ-200-1016	201	1016	0,2/1,0	2500	–	–	55	2–11	1
ЭМУ-100-1016	99	1016	0,2/1,0	550	–	–	55	2–11	1

Filmtec (США)

BW3OLE-440	201	1016	1,07/4,1	1833	99,0	NaCl	45	2–11	0,1
TW3OLE-4040	99	1016	1,07/2,1	316	98,0	NaCl	45	2–11	0,1
BW3O-400	201	1016	1,6/4,1	1670	99,5	NaCl	45	2–11	0,1
BW3O-4040	99	1016	1,6/4,1	347	99,0	NaCl	45	2–11	0,1
SW3OHR-380	201	1016	5,5/6,9	958	99,6	NaCl	45	2–11	0,1
SW3OHR-4040	99	1016	5,5/6,9	128	99,4	NaCl	45	2–11	0,1
NF270-400	201	1016	0,5/1,7	1958	95	MgSO <sub>4</sub>	35	2–11	0,1
NF270-4040	99	1016	0,5/1,7	346	95	MgSO <sub>4</sub>	35	2–11	0,1
NF90-400	201	1016	0,5/1,7	2360	95	MgSO <sub>4</sub>	45	3–10	0,1
NF90-4040	99	1016	0,5/1,7	1070	97	MgSO <sub>4</sub>	45	3–10	0,1

Desal (GE Osmonics США)

AG2514F	61	356	1,38/3,1	28	99,4	NaCl	50	4–11	0,1
AG2521F	61	533	1,38/3,1	47	99,4	NaCl	50	4–11	0,1
AG2540F	61	1016	1,38/3,1	112	99,4	NaCl	50	4–11	0,1
AG4014F	99	356	1,38/3,1	87	99,4	NaCl	50	4–11	0,1
AG4021F	99	533	1,38/3,1	166	99,4	NaCl	50	4–11	0,1
AG4040F	99	1016	1,38/3,1	347	99,4	NaCl	50	4–11	0,1
AK2514F	61	356	0,7/2,76	28	99,0	NaCl	50	4–11	0,1
AK2521F	61	533	0,7/2,76	47	99,0	NaCl	50	4–11	0,1
AK2540F	61	1016	0,7/2,76	112	99,0	NaCl	50	4–11	0,1

Продолжение таблицы 2.12.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
AK4014F	99	356	0,7/2,76	87	99,0	NaCl	50	4-11	0,1
AK4021F	99	533	0,7/2,76	166	99,0	NaCl	50	4-11	0,1
AK4040F	99	1016	0,7/2,76	347	99,0	NaCl	50	4-11	0,1
HL2514F	61	356	0,48-2,07/ 4,14	35	98,0	MgSO <sub>4</sub>	50	3-9	0,1
HL2521F	61	533	0,48-2,07/ 4,14	60	98,0	MgSO <sub>4</sub>	50	3-9	0,1
HL2540F	61	1016	0,48-2,07/ 4,14	136	98,0	MgSO <sub>4</sub>	50	3-9	0,1
HL4014F	99	356	0,48-2,07/ 4,14	110	98,0	MgSO <sub>4</sub>	50	3-9	0,1
HL4021F	99	533	0,48-2,07/ 4,14	202	98,0	MgSO <sub>4</sub>	50	3-9	0,1
HL4040F	99	1016	0,48-2,07/ 4,14	429	98,0	MgSO <sub>4</sub>	50	3-9	0,1

Примечания:

1. Маркировка расшифровывается следующим образом: ЭРО, ЭРН, ЭРУ – Элемент Рулонный Обратноосмотический (Наночастиц, Ультрафильтрационный); КН, КМ, КП – Композитные мембраны Низкого давления, для опреснения Морской воды, на основе Пиперазина соответственно.

2. Маркировка расшифровывается следующим образом: ЭМО, ЭМН, ЭМУ – Элемент Мембранный Обратноосмотический (Наночастиц, Ультрафильтрационный); Н, С, М – элементы Низкого давления, Среднего давления, для опреснения Морской воды.

3. Маркировка расшифровывается следующим образом: BW, TW – обратноосмотические элементы для солоноватых вод, водопроводной воды, обратноосмотические элементы для опреснения морской воды, наночастицы элементы соответственно; LE – низкого давления.

Следует отметить, что для нормальной эксплуатации современных композитных мембран содержание загрязнений (взвеси, коллоиды, нефтепродукты, активный хлор) в питающей воде не должно превышать определенных значений. Кроме того, для каждого типа элементов существуют ограничения по максимальному расходу питающего раствора и минимальному расходу концентрата (табл. 2.13). При работе вне этих пределов могут быть разрушены мембраны, или на них образуются отложения. При увеличении скорости раствора выше указанного возникают нерасчетные продольные усилия в мембранном элементе, а уменьшение расхода концентрата означает и уменьшение тангенциальной скорости раствора вдоль мембраны, которая, как указывалось выше, не должна опускаться ниже 2 м/с. В противном случае возможно образование на поверхности мембраны осадков.

## 2.13. Условия эксплуатации рулонных мембранных элементов

Тип мембран	Обратноосмотические			Нано-фильтрация	Ультра-фильтрация
	Н*	С*	М*		
Рабочее давление, МПа	1,0	1,6	5,5	1,6	0,2-0,5
Максимальное рабочее давление, МПа	2,1	4,0	7,0	2,5	1,0
Максимальная рабочая температура, °С	45				50
Рабочий диапазон pH	2-11 (3-10)	2-11 (3-10)	2-11 (3-10)	3-10	2-11
Максимальный индекс SDI исходной воды	5				
Конверсия, %	15	15	8	15	10
Максимальный поток пермеата (м <sup>3</sup> /час) для элементов длиной 40" и диаметром:					
2,5" – (61 мм)	0,12			0,12	0,12
4" – (100 мм)	0,2			0,2	0,2
8" – (200 мм)	1,5			1,5	1,5
Максимальный расход исходной воды (м <sup>3</sup> /час) для элементов диаметром:					
2,5" – (61 мм)	1,2(1,3)				
4" – (100 мм)	3,6(4,1)				
8" – (200 мм)	17,0(12)				
Минимальный расход концентрата (м <sup>3</sup> /час) для элементов диаметром:					
2,5" – (61 мм)	0,22				
4" – (100 мм)	0,9-1,1				
8" – (200 мм)	2,7-3,6				
Максимальное содержание веществ в исходной воде (мг/л):					
свободный остаточный хлор	0,1				1
нефтепродукты	0,1				
растворенное железо	0,1				

\* Н – низконапорные, С – средненапорные, М – для морской воды.

В скобках приведены данные для отечественных элементов производства ЭКО-ФИЛ по работе [122].

## Корпуса рулонных элементов

Один или несколько элементов последовательно располагаются в пластмассовом или металлическом трубчатом корпусе, имеющем устройства для подвода исходной воды, отвода пермеата и солевого концентрата (рис. 2.28, з).

Давление обрабатываемой воды воспринимается только корпусом, выполненным из нержавеющей стали или композитных пластмасс. Габариты стандартных пластмассовых композитных корпусов для мембран диаметром 200 мм (8") показаны на рисунке 2.30 и в таблице 2.14.

Преимуществом этих аппаратов является высокая плотность упаковки мембран, технологичность изготовления, простота замены элементов. Недостаток состоит в высокой чувствительности таких мембран

к наличию механических загрязнений и необходимости очистки исходного раствора от крупных взвесей.

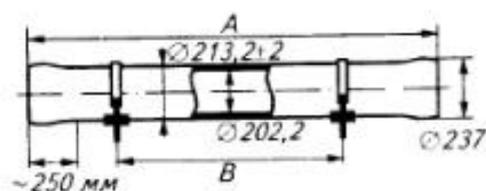


Рис. 2.30. Стандартные композитные корпуса для мембран диаметром 200 мм (8")

#### 2.14. Размеры корпусов для мембран диаметром 200 мм (8")

Количество размещаемых мембранных элементов	Длина корпуса – А, мм	Расстояние между точками крепления В, мм		Масса корпуса, кг, не более
		максимальное	минимальное	
1	1473	875	500	21
2	2489	1890	500	29
3	3505	2910	960	37
4	4521	3190	1970	45
5	5537	3560	2990	55
6	6553	4020	4020	64
7	7569	6170	5090	73

#### 2.1.3.8. Сравнение вариантов аппаратного оформления мембранных процессов

При сравнении различных вариантов аппаратного оформления мембранных процессов (табл. 2.15) видно, что наилучшие показатели имеют половолоконный и рулонный аппараты. Плоскорамный и трубчатый аппараты по своим характеристикам значительно уступают им. Их использование оправдано для ультрафильтрационной переработки растворов, сильно загрязненных взвешенными веществами или сильно химически агрессивных.

#### 2.15. Сравнение различных вариантов аппаратного оформления мембранных процессов (на примере ОО)

Поверхность фильтрации	половолоконный, рулонный >> плоскорамный > трубчатый
Масса	плоскорамный > трубчатый > рулонный >половолоконный
Занимаемая площадь	трубчатый > плоскорамный >>половолоконный > рулонный
Стоимость	трубчатый, плоскорамный >>половолоконный, рулонный
Потребление энергии	трубчатый > плоскорамный >половолоконный > рулонный
Устойчивость к загрязнениям	трубчатый > плоскорамный > рулонный >половолоконный

В таблице 2.16 приведены сводные данные по мембранным процессам, а в таблице 2.17 указаны основные производители мембран и мембранных аппаратов.

#### 2.16. Сравнение мембранных процессов

Процесс	Обратный осмос	Нанофильтрация	Ультрафильтрация	Микрофильтрация
Тип мембраны	асимметричная	асимметричная	асимметричная	асимметричная, симметричная
Поддерживающий слой, мкм	150	150	150–250	10–150
Разделительный слой, мкм	1	1	1	–
Размер пор, мкм	<0,002	<0,002	0,2–0,02	4–0,02
Разделение	низко-, высокомолекулярная органика, ионы, молекулы, глюкоза	высокомолекулярная органика, многозарядные ионы	макромолекулы, протеины, полисахариды, вирусы	частицы, бактерии
Материал мембраны	ацетаты целлюлозы, композитные	ацетаты целлюлозы, композитные	ацетаты целлюлозы, полисульфон, ПВДФ, керамика, композитные	ацетаты целлюлозы, полипропилен, полисульфон, ПЭ, ПВДФ, лавсан, керамика, фторопласты
Тип модуля	трубчатый, спиральный, плоскорамный	трубчатый, спиральный, плоскорамный	трубчатый, спиральный, плоскорамный, полое волокно	трубчатый, спиральный, полое волокно
Рабочее давление, атм	15–150	5–35	1–10	<2

#### 2.17. Основные производители мембран и мембранных аппаратов

Фирма	Головная фирма	Размер компании	Трубчатые	Рулонные	Полое волокно	Керамические	Страна	ОО	НФ	УФ	МФ	Вода	Технологические растворы
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
PTI		Малый		+			USA			+			+
DSS		Малый		+			DK	+	+	+		+	+
Filmtec	Dow Chemical	Большой		+			USA	+	+			+	+
Fluid System	Koch	Средний		+			USA	+	+	+		+	+

Продолжение таблицы 2.17.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Hochst	KCS	Малый		+			Germany	+		+			+
Hydranautics	Torey	Средний		+	+		USA	+				+	
Kiryat Weizman	Koch	Малый	+	+			Israel	+	+	+		+	+
Koch/Abcor		Средний	+	+	+		USA	+		+	+	+	+
Osmonics		Средний		+			USA	+	+	+	+	+	+
PSI	Thames Water	Малый	+				UK	+	+	+			+
Rochem	Pall	Малый					Germany	+					+
SCT		Малый				+	France				+		+
Stork Friesland		Малый	+				Holland	+					+
Synder		Малый		+			USA			+			+
Tami		Малый				+	France				+		+
Toray		Средний		+			Japan	+	+			+	
Trisep		Средний		+			USA	+	+	+			+
XFLOW		Малый			+		Holland			+	+	+	+
Владипор		Средний	+	+			РФ	+	+	+	+	+	+
Экофил		Малый		+			РФ	+	+	+		+	+
ВНИИПВ		Малый			+		РФ			+	+	+	+

### 2.1.3.9. Установки мембранного разделения

Из мембранных элементов собираются установки. Они принципиально отличаются для процессов МФ и УФ, с одной стороны, и НФ, ОО с другой. При этом их схемы мало зависят от типа используемых мембран или элементов.

При удалении механических примесей, когда возможно отстаивание удаленных частиц, либо имеется необходимость концентрирования выделенного компонента, используется схема, приведенная на рис. 2.26. В емкость-смеситель подается исходный и оборотный (концентрат) растворы, а в ряде случаев и специальные добавки, способствующие агрегатированию частиц или повышающие селективность разделения. Насос 2 создает необходимый напор и расход раствора для продавливания воды через мембрану 4 и организации циркуляции концентрата в емкость 1. В емкости осаждаются извлеченные частицы и в виде шлама удаляются из нее. Если осаждения загрязнений не происходит, то работа установки производится до повышения их концентрации до заданного значения, после чего концентрат начинает выводиться либо порционно, либо всем объемом емкости 1, а затем цикл повторяется.

Давление на мембране и расход раствора на циркуляцию регулируется вентилем 6. Как отмечалось выше, для создания турбулентного режима движения жидкости в межмембранных каналах необходимо обес-

печить ее скорость на уровне 2–4 м/с, а расход циркулирующего раствора должен быть примерно в 5 раз больше, чем пермеата. В этом случае достигается относительно продолжительная работа без забивания мембран твердыми частицами или липкими взвесями. Типичный характер зависимости производительности мембран от времени работы демонстрирует плавное ее уменьшение даже при регулярных обратных промывках.

Схема установки для молекулярного разделения (извлечения солей из воды методом обратного осмоса) показана на рис. 2.31. В качестве примера показана установка, разработанная ЗАО «Национальные водные ресурсы» (НВР) для пивного завода «Красный Восток», производительностью 50 м<sup>3</sup>/ч [120].

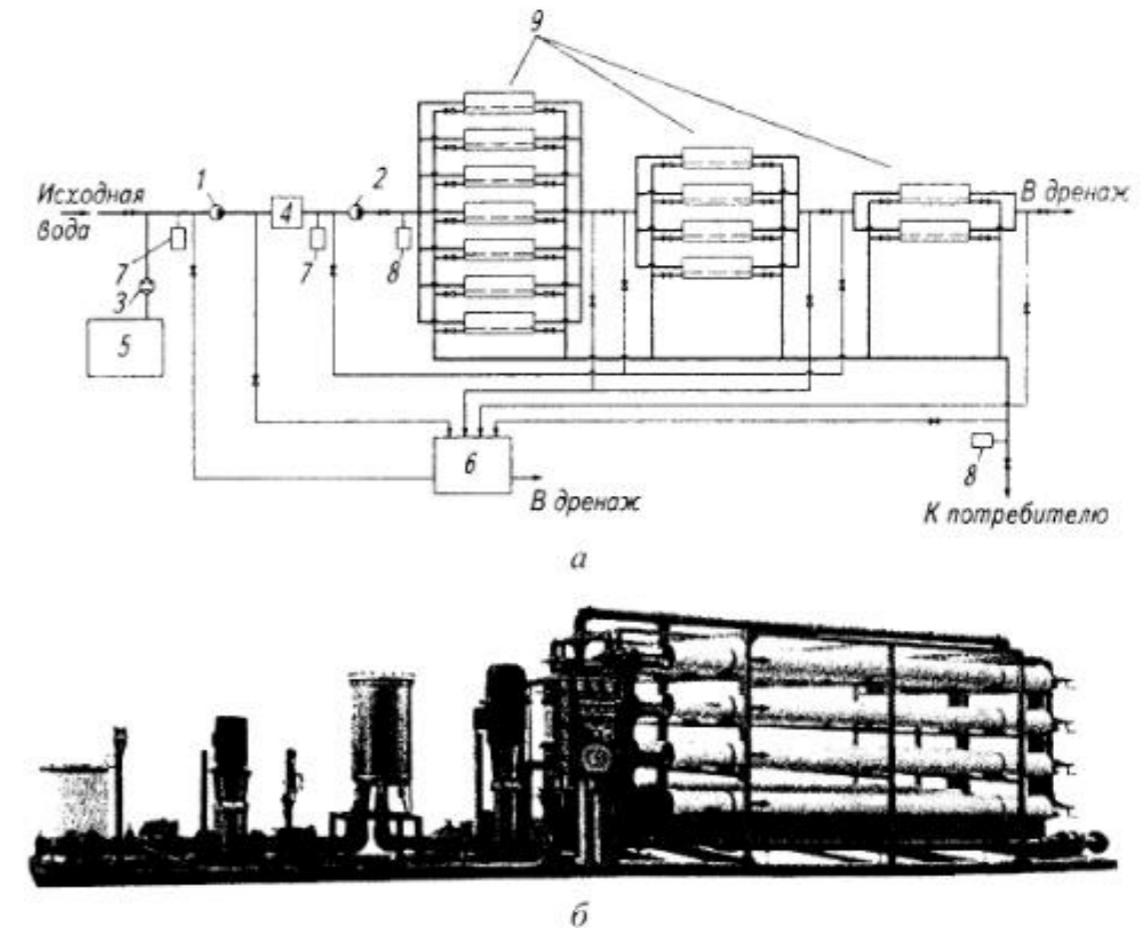


Рис. 2.31. Обратноосмотическая установка производительностью 50 м<sup>3</sup>/ч; а – схема установки, б – внешний вид:

1 – повысительный насос, он же промывочный; 2 – высоконапорный насос; 3 – дозирующий насос; 4 – микрофильтр; 5 – бак ингибитора; 6 – бак промывки; 7 – защита насоса по сухому ходу; 8 – защита трубопроводов по давлению; 9 – блок мембранных модулей

Обязательным условием ее работы является предварительное удаление взвесей на микрофильтрах 4 с размером пор не более 5 мкм. Используются патронные фильтры типа ХИФ со стандартными картриджами фирмы «Harmsco». Затем насосом 2, соответствующего данному процессу и используемым мембранам давления, как правило, марки «Grundfos», раствор подается на блоки мембранных элементов, которые соединены параллельно по пермеату и последовательно по концентрату. В результате, несмотря на то, что на каждой ступени выход пермеата невелик, его суммарный объем может составлять 60–75% от исходного. Причем количество элементов в блоках, расположенных по ходу движения воды, уменьшается. Этим обеспечивается поддержание необходимой скорости потока воды через мембранный элемент при сокращении ее количества после каждой ступени. Минимальный объем концентрата ограничивается не только гидродинамикой аппарата, а прежде всего растворимостью удаляемых солей, в основном солей жесткости, которые могут отлагаться на поверхности мембран.

При работе НФ и ОО установок производительность также падает, однако, поскольку мембраны загрязняются растворимыми солями, их периодическая отмывка специальными реагентами позволяет стабилизировать их работу. Подробнее особенности работы установок обратного осмоса и нанофильтрации и их обслуживания описаны в разделах 3.3 и 3.4.

#### 2.1.4. Обработка воды ультрафиолетом

Ультрафиолетом (УФ) называют невидимую глазом часть спектра электромагнитных волн, имеющих энергию большую, чем у видимого фиолетового света. УФ-излучение охватывает диапазон с длиной волны от 100 до 400 нм. Колебания с длиной волны от 100 до 200 нм называют жестким или вакуумным ультрафиолетом. Их энергии может хватать на разрушение органических молекул. Колебания с длиной волны от 200 до 400 нм генерируются в специальных ртутных или ксеноновых лампах и широко применяются для обеззараживания воды и воздуха от различных микроорганизмов.

Обработка воды ультрафиолетовым излучением [7–15, 135–143] относится к числу безреагентных, физических методов воздействия. Различают два метода облучения ультрафиолетом – импульсное, с широким спектром волн, и постоянное, в выбранном диапазоне волн.

Обеззараживающим (бактерицидным) эффектом обладает только часть спектра УФ-излучения в диапазоне волн 205–315 нм при максимальной эффективности в области  $260 \pm 10$  нм. Обеззараживающий эффект УФ-излучения в первую очередь обусловлен происходящими под его воздействием фотохимическими реакциями в структуре молекул ДНК и РНК, приводящими к их необратимым повреждениям. Кроме того, действие ультрафиолетового излучения вызывает нарушения в

структуре мембран и клеточных стенок микроорганизмов. Все это в конечном итоге приводит к их гибели.

Эффективность обеззараживания (доля погибших под действием УФ облучения микроорганизмов) пропорциональна интенсивности излучения ( $\text{мВт/см}^2$ ) и времени его воздействия (с). Произведение этих двух величин называется дозой облучения ( $\text{мДж/см}^2$ ) и является мерой бактерицидной энергии, сообщенной микроорганизму. Минимальная доза УФ-облучения, регламентируемая методическими указаниями Минздрава РФ для обеззараживания питьевой воды, –  $16 \text{ мДж/см}^2$  («Санитарный надзор за применением УФ-излучения в технологии подготовки питьевой воды» МУ 2.1.4.719-98). Она обеспечивает снижение содержания патогенных бактерий не менее чем на 5 порядков, а по индикаторным бактериям на 2–6 порядков. Такая доза снижает содержание вирусов на 2–3 порядка.

Фотохимические процессы практически не зависят от рН и температуры воды, незначительно зависят от ее химического состава. Наличие взвесей должно обязательно учитываться при выборе режима работы, поскольку они экранируют загрязнения и поглощают часть излучения.

Специалистами НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана были проведены исследования влияния обобщенных показателей качества воды (цветность, мутность, окисляемость, ХПК, БПК) на эффективность УФ-обеззараживания. Показано, что колебания состава речной воды в диапазоне: цветность – 20–50 градусов, мутность – 1–30 мг/л, перманганатная окисляемость – 6–14 мг  $\text{O}_2/\text{л}$ , ХПК – 29–63 мг/л, БПК – 5–10 мг/л не влияют на дозу облучения, необходимую для достижения нормативных показателей по коли-индексу и ОМЧ. Сотрудниками НПО «ЛИТ» на промышленной установке показано, что и при мутности 145 мг/л и коли-индексе 3000000 после УФ-облучения достигается отсутствие колиформных бактерий.

Важнейшим качеством УФ-обработки воды является отсутствие изменения ее физических и химических характеристик даже при дозах, намного превышающих практически необходимые.

Широкая распространенность метода УФ-обеззараживания объясняется такими его достоинствами, как:

- универсальность и эффективность воздействия на различные микроорганизмы;
- экологичность, безопасность для жизни и здоровья человека;
- относительно низкая цена;
- невысокие эксплуатационные расходы;
- низкие капитальные затраты;
- простота обслуживания установок.

Для пищевых производств очень важным преимуществом УФ-обработки является отсутствие необходимости введения дополнительных реагентов, которые могут изменить органолептические характеристики продукта.

Серьезным недостатком УФ-обеззараживания является отсутствие последствий, т. е. очищенная вода может вновь загрязняться на последующих стадиях обработки или транспортировки.

УФ-облучение убивает микроорганизмы, но клеточные стенки бактерий, грибов, белковые фрагменты вирусов остаются в воде. При использовании такой воды в качестве питьевой желательнее удалять их с помощью тонкой фильтрации.

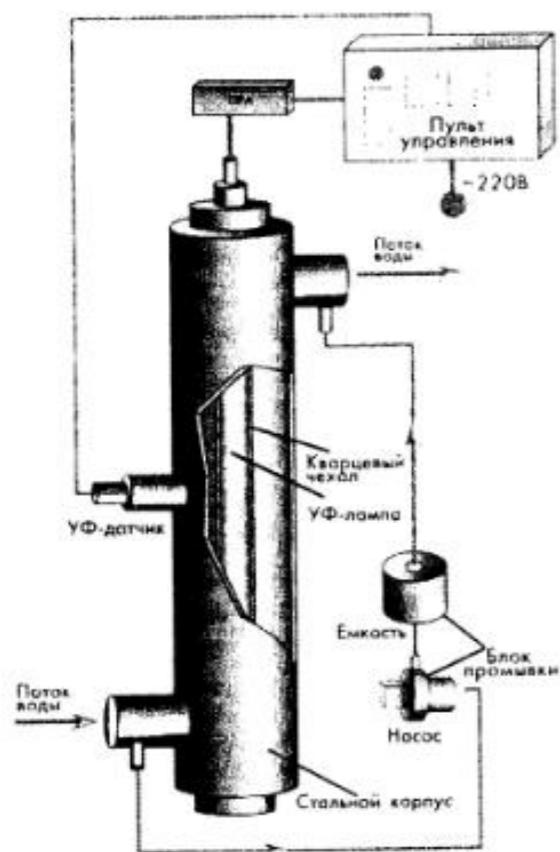


Рис. 2.32. Установка УФ-обеззараживания воды

обеспечивает их легкую замену без слива аппарата. Видно, что конструкция похожа на кожухотрубный теплообменник. Корпус, кварцевые трубки и их крепление рассчитаны на рабочее давление очищаемой воды.

В методических указаниях МУ 2.1.4.719-98 в качестве требований указывается, что УФ-установки должны комплектоваться: датчиками измерения интенсивности УФ-излучения в камере обеззараживания;

Обычная бактерицидная установка УФ-обеззараживания воды (рис. 2.32) состоит из камеры обеззараживания и пульта управления. Иногда они комплектуются блоком промывки.

Камера обеззараживания представляет собой корпус из нержавеющей стали, реже из пластмассы, имеющий патрубки для ввода и вывода очищаемой воды, пробоотборники и датчик УФ-излучения. С торцов корпус закрыт решетками, имеющими отцентрованные с обеих сторон отверстия, число которых соответствует количеству используемых ламп. В эти отверстия герметично устанавливают прочные кварцевые трубки – чехлы. Внутри трубок располагаются бактерицидные лампы (ртутные или ксеноновые), что исключает их непосредственный контакт с водой и

системой автоматики, сигнализирующей о снижении минимальной поглощенной дозы; счетчиками времени наработки ламп и индикаторами их исправности; пробоотборниками и системой очистки кварцевых чехлов. Следует отметить, что стоимость этих устройств велика и их применение на установках малой производительности резко увеличивает их цену. Поскольку эти указания не носят обязательного характера, большинство производителей ограничиваются рекомендацией смены ламп при наработке ими гарантийного ресурса. На муниципальных установках подготовки питьевой воды необходимо обеспечивать их полную комплектацию.

Количество ламп в установке зависит от ее производительности, предназначения, типа и качества обрабатываемой воды. Длина корпуса определяется типом применяемых ламп.

Поскольку для зажигания ртутных ламп необходимо создание специальных условий, все установки содержат пускорегулирующее устройство, а крупные – и специальный блок управления и контроля. Для обеспечения высокой надежности работы, учитывая незначительное энергопотребление ламп, предпочитают их эксплуатацию при постоянном горении. Ресурс отечественных ламп составляет 6000–7000 часов, импортных – 8000–10000 часов. Затем лампы заменяют.

Очистка кварцевых труб осуществляется либо механическим способом, либо химической промывкой.

УФ-установки выпускаются огромным числом изготовителей за рубежом и не менее чем 10 в России. Их производительность колеблется от литров в час для бытовых систем, устанавливаемых «под мойку», до нескольких тысяч м<sup>3</sup>/ч для городских систем. Наиболее крупными производителями УФ-установок в России являются НПО «ЛИТ» и ЗАО «НВР». В их ассортименте установки с единичной производительностью от 1 до 3000 м<sup>3</sup>/ч.

Возможны различные варианты расположения УФ-установок на очистных сооружениях, как в начале, так и в конце технологической цепочки. Выбор оптимального места определяется по результатам технологических исследований на конкретных очистных сооружениях. Учитывая, что действие УФ-излучения ограничивается объемом аппарата, для большинства случаев обработку воды целесообразно проводить в конце процесса, перед ее подачей потребителю.

Следует отметить, что эффективность УФ-обеззараживания воды может быть дополнительно повышена путем сочетания с другими методами обеззараживания и с физическими воздействиями. Так, одновременная обработка воды кавитацией или ультразвуком и ультрафиолетом, введение малых доз озона после УФ-обработки позволяют сократить необходимую дозу облучения и гарантировать полное обеззаражи-

вание воды даже при наличии взвесей. Введение незначительных доз активного хлора обеспечивает эффект последствия, т. е. отсутствие повторного обсеменения воды. Аналогичный эффект дает обработка воды серебром, медью, йодом (см. раздел 3.6).

Жесткое УФ-излучение в области 100–200 нм вызывает образование озона из молекул растворенного в воде кислорода и непосредственно воздействует на молекулы органических соединений. При использовании мощных импульсных ксеноновых ламп это создает возможность глубокой фотохимической очистки воды от загрязнения нефтепродуктами, пестицидами, токсическими и мутагенными циклическими органическими соединениями. Такие установки серии «Био-Пульсар» разработаны НИИ «Эко-Пульсар» [143].

Установки, в которых совмещено воздействие кавитации и УФ-излучения, типа «Лазурь» разработаны в АО «Сварог». В них материалом чехлов для УФ-ламп вместо кварцевого стекла служит т. н. «Супрасил», который пропускает жесткое УФ-излучение с длиной волны 180 нм.

Кавитация приводит к образованию микропузырьков воздуха, которые образуются на микрозагрязнениях, таких как пылинки и микробы. При «схлопывании» пузырьков возникают большие перепады давления, которые уничтожают микробы. Одновременно в этих пузырьках под действием УФ-излучения образуются активные радикалы, которые эффективно уничтожают микрофлору и окисляют органику. При этом весь объем воды обрабатывается ультрафиолетом. Как считают разработчики, такое тройное воздействие много эффективнее простой раздельной обработки облучением и кавитацией.

## 2.2. Химические методы очистки

### 2.2.1. Процессы окисления

Природная вода содержит различные органические вещества и биологические загрязнения. Они придают ей цветность, запах, привкус, служат источником заражения болезнетворными микроорганизмами. В воде также содержатся в виде раствора катионы тяжелых металлов низкой валентности, например, железо и марганец, анионы в высшей валентности и растворенные газы, например, гидросульфаты и сероводород. Одним из путей улучшения качества воды является обработка ее окислителями [7–15, 144–174]. Первоначально окислители применялись с целью обеззараживания (дезинфекции) и лишь позднее для улучшения цветности, вкуса, привкуса и запаха (для обесцвечивания, дезодорации, обезжелезивания и деманганации).

Основными окислителями, используемыми в водоподготовке, являются:

- кислород воздуха;
- хлор-газ  $Cl_2$ ;
- другие галогены: Br, I;
- диоксид хлора  $ClO_2$ ;
- гипохлорит натрия  $NaClO$ ;
- гипохлорит кальция  $Ca(ClO)_2$ ;
- хлорная известь (хлорид-хлорат кальция);
- хлорамины;
- озон  $O_3$ ;
- перманганат калия  $KMnO_4$ ;
- пероксид водорода  $H_2O_2$ .

Кислород, содержащийся в воздухе, в количестве примерно 20%, является достаточно слабым окислителем. Он практически не действует на растворенные органические вещества, а для биологических объектов является необходимым элементом их существования и размножения. В то же время кислород окисляет растворенные катионы тяжелых металлов (железо и марганец) до их высших валентностей, при которых они легче гидролизуются и затем удаляются фильтрованием. Такие процессы чрезвычайно распространены в практике водоподготовки (см. раздел об обезжелезивании). Другие, более сильные окислители не только окисляют неорганические ионы, но и дезинфицируют и дезодорируют воду.

В мировом масштабе первое место среди дезинфицирующих веществ (дезинфектантов) занимает хлор и его соединения.

Эффективность действия любых окислителей определяется произведением их концентрации и времени воздействия. Существенное значение имеют рН среды, температура воды, наличие различных неорганических веществ, а также соотношение концентраций трудно- и легкоокисляемых соединений.

Хлор действует на органические вещества, окисляя их, и на бактерии, которые погибают в результате окисления веществ, входящих в состав протоплазмы клеток.

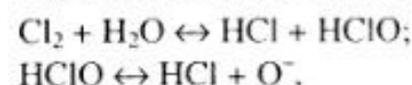
Хлор обладает высокой дезинфицирующей способностью, относительно стоек и длительное время сохраняет активность. Он легко дозируется и контролируется. При реакциях с органическими веществами происходит образование тригалогенметанов и хлорфенолов, придающих воде запах, а также чрезвычайно токсичных диоксинов. Из-за этого требуется последующая доочистка воды.

Хлорирование требует наличия систем транспортировки и хранения хлора.

Доза хлора при хлорировании предварительно фильтрованной воды составляет 2–5 мг/л в зависимости от ее хлорпоглощаемости, т. е. от

наличия в ней органических и неорганических веществ, реагирующих с хлором. Она должна устанавливаться с таким расчетом, чтобы в воде, поступающей к потребителю, оставалось 0,3–0,5 мг/л свободного хлора. Это обеспечивает отсутствие вторичного заражения (обсеменения) воды.

Гидролиз хлора протекает по реакции:



с образованием хлорноватистой кислоты, диссоциирующей на соляную кислоту и атомарный кислород, который в кислой и щелочной средах обладает сильными окислительными свойствами.

Кроме того, хлор непосредственно реагирует со многими органическими веществами, образуя их хлорпроизводные, такие как хлорфенолы, хлороформ и др.

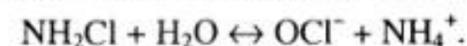
Для дозирования хлора в воду применяют специальные вакуумные хлораторы. Они содержат узел хранения жидкого хлора, испаритель, системы фильтрации и измерения расхода газа, а также эжектор, создающий разрежение и подсасывающий газообразный хлор в смеситель, а затем полученную хлорную воду – в поток обрабатываемой воды.

Хлор продолжает оставаться основным дезинфицирующим средством и для оптимального эффекта дополняется другими средствами (озонированием, ультрафиолетовым облучением и т. п.). К его недостаткам относятся: высокая токсичность, трудность обеспечения жидким хлором удаленных объектов, образование токсичных и дурнопахнущих хлорпроизводных. Постоянно проводятся исследования по замене хлора на реагенты, имеющие близкую окислительную способность, но лишённые его недостатков.

Для увеличения продолжительности бактерицидного действия хлора и предотвращения образования хлорфенольных запахов в воду наряду с хлором вводят аммиак. При его взаимодействии с хлорноватистой кислотой, которая образуется при хлорировании воды, получается монохлорамин:

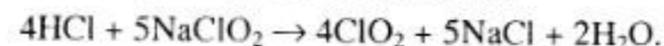


который, гидролизуясь, образует сильный окислитель – гипохлоритный ион:



Гидролиз хлорамина протекает достаточно медленно, поэтому в первое время его окислительное действие ниже, чем хлора. Однако длительность бактерицидного действия хлорамина существенно больше. Поэтому аммонизацию применяют, если вода длительное время должна находиться в промежуточных резервуарах и сетях. Соотношение доз хлора и аммиака зависит от состава исходной воды. Обычно используется соотношение, когда аммиака в 5–6 раз меньше, чем хлора.

**Диоксид хлора** [148–151] сильнее хлора и как дезинфектант, и как окислитель, прекрасно уничтожает привкусы и запахи, не взаимодействует с аммиаком и эффективен в широком диапазоне pH. Однако он взрывоопасен и не может сжигаться, храниться и перевозиться. Поэтому он должен получаться на месте потребления (известно два метода: реакция хлорита натрия с хлором в присутствии кислоты или реакция хлорита натрия с соляной кислотой). В настоящее время более распространен метод получения по реакции:



Полученный раствор дозируется в обрабатываемую воду, пропорционально ее расходу (см. главу 6).

По сравнению с хлором диоксид хлора обладает рядом преимуществ:

- более высокое бактерицидное и дезодорирующее действие;
- отсутствие в очищенной воде хлорорганических соединений;
- высокий уровень окисления (до образования  $\text{CO}_2$ );
- улучшение органолептических свойств воды.

Недостатком этого способа является образование вредных продуктов – хлоритов и хлоратов – и большая стоимость по сравнению с хлором (и озоном).

В связи с высокой стоимостью диоксида хлора возможно применять его совместно с хлором – хлор вводится в воду на насосной станции или перед отстойниками в дозе, равной хлороемкости воды, а  $\text{ClO}_2$  поступает в осветленную воду в дозе 0,5–1,0 мг/л для глубокого обеззараживания, снижения запахов и цветности воды, а также улучшения ее вкуса.

В настоящее время предлагаются полностью автоматизированные установки для производства диоксида хлора и его дозирования в воду.

**Гипохлорит натрия** –  $\text{NaClO}$  [7–15, 153–155] – стал применяться для дезинфекции с самого зарождения хлорной промышленности благодаря высокой антибактериальной активности и широкому спектру действия на различные микроорганизмы. Однако содержание активного хлора в нем относительно мало, его растворы имеют ограниченную стойкость и постепенно разлагаются с понижением содержания активного хлора.

Окислительное и бактерицидное действие гипохлорита натрия идентично растворенному хлору, кроме того, он обладает пролонгированным бактерицидным действием.

Одним из наиболее перспективных способов обеззараживания природной воды является использование гипохлорита натрия, получаемого на месте потребления путем электролиза 2–4%-ных растворов хлорида натрия (поваренной соли) или природных минерализованных вод, содержащих не менее 50 мг/л хлорид-ионов [7–15, 153–155].

В настоящее время рядом заводов России серийно выпускаются электролизеры различной производительности для получения гипохлорита натрия. Производятся как малогабаритные установки типа «Санер» с производительностью до 10 т/ч, так и относительно крупные серии ЭН, «Поток» и им подобные, с производительностью до нескольких кг в час в пересчете на активный хлор.

Такие установки предназначены для обеззараживания до 1000 тыс. м<sup>3</sup> воды в сутки. Производимый раствор содержит от 6 до 12 г/л по активному хлору. Расход электроэнергии составляет 6–8 кВт на кг активного хлора, а расход поваренной соли – 12 кг/кг хлора.

При достаточном содержании хлоридов в самой обрабатываемой воде обеззараживание может осуществляться путем непосредственного ее электролиза. Для реализации такого способа разработаны установки «Поток» производительностью до 100–120 м<sup>3</sup>/ч (при содержании хлоридов в воде 80–100 мг/л).

Наряду с достоинствами у обеззараживания воды гипохлоритом натрия, производимым на месте потребления, имеется и ряд недостатков, прежде всего – повышенный расход поваренной соли, обусловленный низкой степенью ее конверсии (до 10–20%). При этом остальные 80–90% соли в виде балласта вводятся с раствором гипохлорита в обрабатываемую воду, повышая ее солесодержание. Снижение же концентрации соли в растворе, предпринимаемое ради экономии, увеличивает затраты электроэнергии и расход анодных материалов.

В целях повышения эффективности и надежности обеззараживания воды в 1991 г. АО «Кемвод», г. Кемерово, впервые в России внедрило технологию обеззараживания питьевой воды привозным техническим гипохлоритом натрия [13]. Указывается, что технология, надежная и простая в эксплуатации, позволила улучшить экологическую ситуацию в населенном пункте, повысить гигиеническую безопасность процесса очистки, обеспечить стабильное качество питьевой воды и уменьшить коррозию оборудования трубопроводов в 10–20 раз. Технология внедрена на водопроводных очистных сооружениях производительностью 30 и 240 тыс. м<sup>3</sup>/сутки, а также в восьми городах и поселках Кузбасса. Однако данный метод обеззараживания, снимающий многие проблемы, присущие электрохимическому получению гипохлорита натрия на месте применения, целесообразно использовать в тех городах, где существуют предприятия химической промышленности, которые выпускают указанный продукт. В противном случае потребуются перевозки гипохлорита натрия спецтранспортом, что может существенно ухудшить экономические показатели процесса обеззараживания воды.

**Гипохлорит кальция** содержит больше активного хлора и более стабилен, чем гипохлорит натрия. Однако при его растворении в воде

образуется не только хлорноватистая кислота, но и гидроксид кальция, из-за чего раствор гипохлорита кальция имеет сильно щелочную реакцию. Так, даже 1%-ный раствор гипохлорита кальция имеет pH 10–11, и при его введении обрабатываемая вода подщелачивается.

**Перманганат калия** удобен тем, что не образует веществ с неприятным запахом, не дает побочных эффектов. Его растворы допускают длительное хранение. Из-за сильного окисляющего воздействия он расходуется в первую очередь на взаимодействие с органическими и неорганическими веществами, что мешает дезинфицирующему действию. К тому же его дезинфицирующее действие ниже, чем у хлора и озона. Поэтому для дезинфекции перманганат калия редко применяется самостоятельно. Используется для перевода солей двухвалентного железа и марганца в четырехвалентное состояние, в котором они легко гидролизуются (см. раздел об обезжелезивании).

К недостаткам перманганата калия следует отнести его высокую стоимость, дефицитность и опасность передозировки, поскольку марганец в питьевой воде нормируется на уровне 0,1 мг/л.

**Пероксид водорода** стало возможным применять в технологии водообработки только после освоения удобных и дешевых методов его получения (анодное окисление бисульфита или серной кислоты или прямое окисление изопропилового спирта). В то же время пероксид водорода токсичен, и его содержание в воде ограничивается по санитарно-токсикологическому признаку вредности уровнем 0,1 мг/л, в то время как дезинфицирующее действие пероксида водорода проявляется на уровне единиц и сотен мг/л.

**Озон** является наиболее сильным из всех известных в настоящее время окислителей [7–15, 161–174]. Для обработки воды он используется уже около ста лет. Однако только в последние 25–30 лет благодаря разработке озонаторов третьего поколения, резко упростивших и удешевивших его производство, началось бурное внедрение процессов озонирования. Предлагаются установки для производства озона в количестве от граммов до десятков килограммов в час. Они могут использоваться в небольших устройствах и городских станциях.

Преимуществом озонирования является неспособность озона, в отличие от хлора, к реакциям замещения. Особенностью озона является и быстрое разложение в воде с образованием кислорода, т. е. озон обладает практически полной экологической безопасностью. К недостаткам озона относится сложность его производства на месте использования, необходимость больших затрат электроэнергии на его синтез, а также малое последствие, поскольку озон разлагается в воде примерно за 30 минут. Это заставляет проводить финальное хлорирование, правда, с дозой, существенно уменьшенной по сравнению с обычным способом, что предотвращает образование токсичных хлорпроизводных.

Преимущество озонирования перед хлорированием объясняется следующим. По традиционной схеме улучшение качества воды обеспечивается тремя процессами. Для обесцвечивания воды применяется коагуляция. Улучшение ее органолептических свойств достигается при помощи сорбционных методов. Для обеззараживания воды применяется хлорирование. Необходимость использования трех различных процессов усложняет технологию обработки воды. При использовании коагулянтов в воду вносятся дополнительные загрязнения. Из-за значительной стоимости сорбционных загрузок часто приходится отказываться от улучшения вкусовых свойств воды. Использование хлора приводит к образованию упомянутых хлорорганических соединений, оказывающих сильное действие на организм человека.

Озонирование за счет высокой окислительной способности озона позволяет одновременно достичь обесцвечивания воды, устранения привкусов и запахов и ее обеззараживания. При этом в воду не вносятся посторонние примеси и не образуются вредные для человека соединения.

Механизм бактерицидного действия озона объясняется его влиянием на обмен веществ в живой клетке, при котором нарушается равновесие превращения активной сульфидной группы в неактивную группу. Установлено, что озон универсально разрушает микроорганизмы в воде. Это можно объяснить способом действия озона. В отличие от обычно употребляемого хлора, озон не дает обратного замедляющего эффекта на внутриклеточные ферменты. Из-за высокой окислительной способности озон действует как окислитель на стенку-мембрану клетки вплоть до проникновения внутрь микроорганизма и окисления определенных важных компонентов (протеинов, ферментов, ДНК, РНК). Когда большая часть мембраны разрушена, клетка погибает. Если стенка-мембрана разрушена частично, клетка может соединиться с другой клеткой, что объясняет наблюдаемые иногда явления регенерации (сублетальное поведение).

Озонирование имеет преимущества перед хлорированием по воздействию на органолептические характеристики воды. Известно, что окраска вод обусловлена наличием попадающих в них в результате вымывания из почвы или торфа окрашенных гумусовых кислот (в составе гумусовых кислот различают гуминовые кислоты и фульвокислоты). При этом обесцвечивание раствора гуминовых кислот почвенного и торфяного происхождения озоном не связано с деструктивным окислением, поскольку в углекислый газ в этих условиях переходит незначительная часть углерода. Наблюдаемое обесцвечивание объясняется окислением фенольных гидроксидов до соответствующих хинонов и далее разрывом молекул по мостикам, соединяющим ароматические ядра, и образованием менее окрашенных фульвокислот, а гумусовые кислоты остаются в воде в виде малоокрашенных креновых и надкреновых кислот.

При озонировании продуктов жизнедеятельности микроорганизмов и водорослей происходит практически полное удаление запахов и привкусов в широком диапазоне кислотности, температуры и ионного состава воды.

Интересным вариантом использования озонирования является его применение при производстве бутилированной воды. Вводя в воду непосредственно перед розливом избыточное количество озона, добиваются того, что после закупорки бутылей выделяющийся из воды озон стерилизует их верхнюю часть и пробку. Затем озон медленно разлагается, насыщая воду кислородом, что придает ей родниковый вкус.

Используется озон и для «холодной стерилизации» емкостей, трубопроводов и бутылок. Для этого их обрабатывают водой с растворенным значительным избытком озона.

По современной технологии **производство озона** [8, 9, 156–161] осуществляется на месте применения на специальных установках – озоногенераторах. Озон образуется при высокочастотном коронном разряде в потоке осушенного воздуха. Расход энергии составляет 5–15 кВт/кг  $O_3$ /ч. Концентрация озона в воздушно-озонной смеси составляет 50–250 г/м<sup>3</sup>. Основными российскими производителями озоногенераторов и установок являются: завод «Курганхиммаш», НВП «Озонит», ГКНПЦ им. Н. В. Хруничева, НПО «Химавтоматика», НПО «Энергия», РИЦ «Курчатовский институт». Новым разработчиком всего комплекса озонирования стал Московский институт теплотехники. Создан новый тип озонаторов с плоскими охлаждаемыми электродами, позволяющими увеличить рабочую частоту до 18 кГц. Это позволило повысить эффективность и единичную мощность озоногенератора. Создание комплекса вспомогательного оборудования на базе авиационно-ракетных технологий дало возможность создать относительно малогабаритную систему с высокой надежностью, с производительностью 25 кг  $O_3$ /ч. С 2003 г. система внедряется на московской Восточной водопроводной станции.

Следующей задачей является введение озона в воду. Для его растворения используются методы барботажа и эжекции.

В крупных промышленных установках наиболее часто используется барботаж озono-воздушной смеси через очищаемую воду. Сложнейшей проблемой является обеспечение одинакового времени контакта пузырьков с водой. Для этого необходимо создание равномерных пузырьков, а также их введение по всему объему воды.

В установках относительно небольшой производительности наиболее распространен и достаточно эффективен метод эжекции. Очищаемая вода проходит через эжектор, создает в нем разрежение, при котором в воду засасывается необходимое количество озона. Интенсивное перемешивание в эжекторе диспергирует озон на мельчайшие пузырьки

с огромной поверхностью контакта. Поэтому скорость растворения велика. Кроме того, разрежение на линии после озоногенератора гарантирует безопасность от попадания озона в воздух рабочих помещений.

После растворения озона необходимо обеспечить определенное время его контакта с водой для осуществления химических реакций окисления и удаления из воды избыточного количества воздуха и озона. Для этого устанавливают контактно-сепарационный аппарат, из которого вода направляется на угольный фильтр для доочистки от органики и деструкции озона.

Совместить эффективное растворение озона и заданную длительность его контактирования с водой позволяют пульсационные колонны со специальными распределительными тарелками [7–15, 168, 169]. Озоно-воздушная смесь вводится в нижнюю часть колонны; возвратно-поступательное движение воды, создаваемое специальным пульсатором, и распределительные тарелки обеспечивают ее диспергацию до пузырьков заданных оптимальных размеров, которые поднимаются противотоком к двигающемуся вниз потоку воды. Этим достигается высокая степень использования озона при большой удельной производительности аппарата.

При любом методе подачи озона он полностью никогда не растворяется и удаляется с отходящими из адсорбера газами. Допустимое содержание озона в воздухе составляет  $0,2 \text{ мг/м}^3$ . Поэтому этот озон должен быть деструктирован. Используются каталитический и термический методы.

### 2.2.2. Осадительные методы

**Осадительные методы очистки** характеризуются образованием малорастворимой твердой фазы, на поверхности или внутри которой задерживаются коллоидные и (или) растворенные загрязнения [1–15, 175–190]. Эта фаза создается за счет введения специальных реагентов.

Осадительные методы широко распространены в подготовке питьевой воды, а также воды для технических потребностей.

Достоинствами осадительных методов являются: низкая стоимость, использование широко распространенного и отработанного оборудования и доступных реагентов. Эти методы дают хорошие результаты по выведению коллоидных и взвешенных частиц.

Недостатки методов: низкий коэффициент очистки, малая производительность, образование большого объема вторичных отходов (шламов), отсутствие очистки от растворенных солей, увеличение общего солесодержания, а в некоторых случаях добавление токсичных реагентов.

Для увеличения производительности и уменьшения объема шламов вводят специальные дополнительные вещества – флокулянты, пред-

ставляющие собой растворимые высокомолекулярные вещества, молекулы которых обладают в растворенном виде зарядом.

Различают три основных осадительных метода: **коагуляция, флокуляция и химическое осаждение**.

**Коагуляция** – образование и осаждение в жидкой фазе гидроксидов железа или алюминия с адсорбированными на них коллоидами загрязнений и соосажденными гидроксидами тяжелых металлов.

**Флокуляция** – процесс агрегации частиц, в котором в дополнение к непосредственному контакту частиц происходит их адсорбционное взаимодействие с молекулами высокомолекулярного вещества, называемого флокулянтном.

**Химическое осаждение** – образование и осаждение в жидкой фазе малорастворимых кристаллических осадков с соосажденными ионами загрязнений.

#### Коагуляция

При коагуляции в раствор вводятся специальные реагенты, при взаимодействии которых с водой образуется новая малорастворимая высокопористая фаза, как правило, гидроксидов железа или алюминия [1–15, 175–189]. Происходит также соосаждение тяжелых металлов, по свойствам близких к вводимому в раствор коагулянту. Этот метод широко распространен в водоподготовке.

Образующиеся хлопья размером  $0,5\text{--}3,0 \text{ мм}$  и плотностью  $1001\text{--}1100 \text{ г/л}$  имеют очень большую поверхность с хорошей сорбционной активностью. В процессе ее образования и седиментации в структуру включаются взвешенные вещества (ил, клетки планктона, крупные микроорганизмы, остатки растений и т. п.), коллоидные частицы и та часть ионов загрязнений, которые ассоциированы на поверхности этих частиц.

В качестве коагулянтов обычно используют соли слабых оснований – железа и алюминия – и сильных кислот:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{AlCl}_3$ . При растворении они гидролизуются. Взаимодействуя с гидроксильными ионами, содержащимися в воде в результате электролитической диссоциации последней, эти соли образуют нерастворимые фазы. В воде накапливаются катионы водорода, в результате чего раствор приобретает кислую реакцию.

При реакциях образуется избыток водородных ионов. Благодаря наличию в воде буферной системы  $\text{HCO}_3^- - \text{H}_2\text{CO}_3$  с рН близким к 7, рН воды при гидролизе коагулянтов в большинстве случаев уменьшается незначительно. При щелочности более  $1,0\text{--}1,5 \text{ мг-экв/л}$  не возникает затруднений в нейтрализации этого избытка. Щелочность уменьшается соответственно введенной дозе коагулянта:



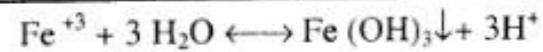
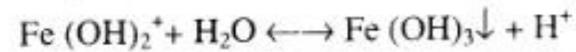
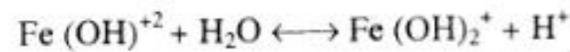
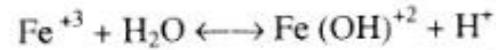
Если щелочности недостаточно (например, в паводковый период), необходимо подщелачивать воду для полного гидролиза всего вводимого коагулянта.

Полнота гидролиза имеет большое значение не только для самой коагуляции, но и для качества очищенной воды, поскольку наличие катионов железа и алюминия в воде жестко регламентировано.

#### Коагуляция с солями железа

В процессе коагуляции используют следующие железосодержащие реагенты: хлорное железо –  $\text{FeCl}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$ ; сульфат двухвалентного железа (железный купорос) –  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ; сульфат трехвалентного железа –  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \times 2\text{H}_2\text{O}$ .

Реакции, протекающие в жидкой фазе при введении в раствор солей железа, описываются уравнениями:



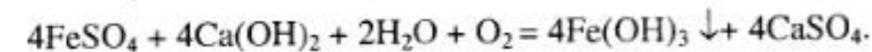
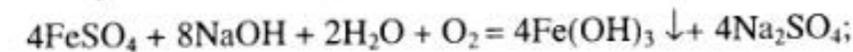
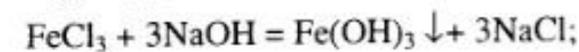
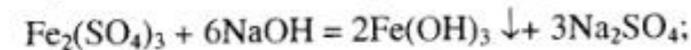
Гидролиз железного купороса описывается уравнением:



Образующийся  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  под действием кислорода воздуха, растворенного в воде, окисляется до  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .

При гидролизе железа образуются катионы водорода и щелочность уменьшается. Если щелочности в воде недостаточно для полного проведения процесса, необходимо ввести в воду дополнительные гидроксил-ионы.

При избытке щелочи происходят реакции:



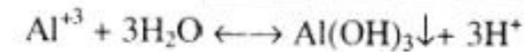
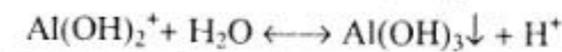
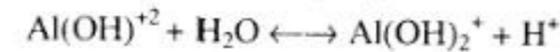
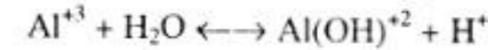
Окисление двухвалентного железа растворенным в воде кислородом в гидроксид железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  происходит с малой скоростью и достигает приемлемых значений только в щелочной среде при  $\text{pH} > 8$ . Гидроксид представляет собой высокопористый осадок с большой поверхностью.

#### Коагуляция с солями алюминия

Основным реагентом, традиционно применяемым на отечественных станциях водоподготовки, является сульфат алюминия –  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$ .

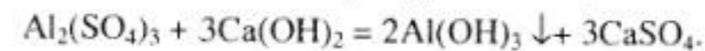
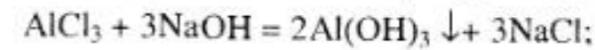
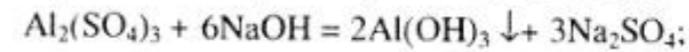
В настоящее время предлагается множество коагулянтов, содержащих алюминий: оксихлорид алюминия, гидроксохлорид алюминия –  $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl} \times 6\text{H}_2\text{O}$ , полигидроксохлорид и др.

Реакции, протекающие в жидкой фазе при введении в раствор солей алюминия, описываются уравнениями:



Процессы протекают аналогично с солями железа.

При избытке щелочи происходят реакции:



Гидроксид алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$  образуется при  $\text{pH} 5,5-7,5$ . Из-за его амфотерности при  $\text{pH}$  меньше 4,4 осадок не образуется, а образуются основные растворимые соли, а при  $\text{pH}$  больше 8,5 гидроокиси растворяются с образованием алюминатов.

Для удаления гуминовых кислот осаждение желательно проводить при  $\text{pH} 5,5-6,0$ , поскольку при этих условиях гуматы переходят в труднорастворимые и хорошо коагулируемые гуминовые кислоты.

Гидроксид алюминия образует высокопористый осадок с большой поверхностью. Осадок  $\text{Al}(\text{OH})_3$  более рыхлый, чем  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Он осаждается с меньшей скоростью и имеет больший объем.

Современные коагулянты на основе гидроксохлорида – полигидроксохлорид, гидроксохлорсульфат алюминия, Аква-Аурат и т. п. – позволяют существенно повысить качество и интенсифицировать процесс. Они имеют ряд существенных преимуществ перед сульфатом алюминия, а именно:

- значительно большее содержание активного вещества;
- соответственно меньшая доза коагулянта, минимум в 2 раза;
- удобство и технологичность использования;
- меньшие мутность, цветность очищенной воды, объем осадка, время коагуляции;
- минимальное остаточное содержание алюминия –  $< 0,2$  мг/л;
- широкий диапазон рабочих температур, вплоть до  $0,5$  °С;
- отсутствие изменения  $\text{pH}$ .

Их большая стоимость окупается указанными преимуществами, и они являются наиболее перспективными коагулянтами.

Следует отметить, что для любого процесса коагуляции первостепенное значение имеет выбор дозы коагулянта и pH воды. Как правило, они подбираются при пробной коагуляции на специальном стенде. На нем же регулярно проводят контрольную коагуляцию для уточнения режима работы при изменении состава воды.

#### *Контактная коагуляция*

Сократить объем используемого оборудования и расход реагентов позволяет так называемая контактная коагуляция. Она реализуется при введении раствора коагулянта перед механическим фильтром. В этом случае зерна загрузки и адсорбированные на них частицы служат центрами коагуляции – «затравкой». При этом резко ускоряется процесс роста хлопьев, которые образуются непосредственно на зернах загрузки и, соответственно, отпадает необходимость в их отстаивании. Процесс ускоряется в десятки раз.

Незначительное распространение контактной коагуляции объясняется быстрым загрязнением обычных фильтров и необходимостью их частой регенерации. Однако при использовании фильтров непрерывного действия (раздел 2.1.2) такой процесс очень перспективен и в настоящее время распространяется на Западе.

#### **Флокуляция**

Флокуляция – процесс агрегации частиц, в котором в дополнение к непосредственному контакту частиц происходит их адсорбционное взаимодействие с молекулами высокомолекулярного вещества, которое называют флокулянтами [8–11, 178–180, 191].

При введении флокулянта резко ускоряется процесс образования и осаждения хлопьев при коагуляции, увеличивается плотность агрегатов и осадков, расширяется диапазон pH эффективного действия коагулянтов.

При наличии в воде значительного количества взвешенных частиц флокулянты могут обеспечивать их осаждение без введения дополнительных реагентов – коагулянтов.

Флокулянты бывают неорганическими и органическими, природными и синтетическими, ионогенными и амфотерными.

Неорганические флокулянты – активная кремниевая кислота, АКФК; природные – крахмал, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ). Синтетические представляют собой органические водорастворимые высокомолекулярные соединения с молекулярной массой от десятков тысяч до миллионов. Они получили наибольшее распространение из-за лучших флокуляционных свойств и широкого выбора различных модификаций.

Флокулянты могут быть катионными, анионными или не иметь заряда.

Универсальным флокулянтом является нейтральный флокулянт полиакриламид (ПАА). Он выпускается в виде сухого продукта или 8% геля, которые перед использованием растворяют до 0,1% раствора. Сухой продукт имеет преимущества перед гелем, поскольку организация процесса растворения значительно проще.

ПАА широко используется для повышения эффективности процессов коагуляции и реагентного осаждения. Его применяют как при подготовке питьевой и технической воды, так и при очистке сточных вод и промывных растворов и шламов установок водоподготовки с большим содержанием взвесей.

Доза 0,1% раствора ПАА составляет 0,5–1,5 мг ПАА на 100 г взвешенных веществ. Раствор ПАА вводится через 0,5–2,0 минуты после ввода коагулянта.

Анионные флокулянты – сополимеры акриламида с акриловой кислотой, имеющие молекулярную массу 3000000–200000000, заряд 0–100%.

Катионные флокулянты – сополимеры акриламида с диметиламиноэтилметакрилатом и другими катионными мономерами – имеют молекулярную массу 300000–10000000 и заряд 0–100%. Выпускаются отечественные флокулянты катионного типа ВА-3, ВА-102, ВПК-402, КФ. В отличие от ПАА, они вызывают образование крупных хлопьев без введения коагулянтов и могут использоваться самостоятельно. Такой процесс имеет существенные преимущества по сравнению с коагуляцией, поскольку не меняется солевой состав воды и в нее не вводятся дополнительные примеси.

### **2.3. Физико-химические методы очистки**

#### **2.3.1. Сорбционные процессы**

Сорбционные методы [1, 3–11, 191–236] очистки основаны на процессах адсорбции и ионного обмена.

Извлечение ионов из раствора осуществляется методом ионного обмена.

Извлечение молекул из раствора осуществляется методом адсорбции.

##### **2.3.1.1. Адсорбция**

**Адсорбция** – поглощение молекул растворенного вещества твердым нерастворимым телом – *адсорбентом*. Поглощение происходит за счет физической сорбции или хемосорбции на развитой поверхности адсорбента.

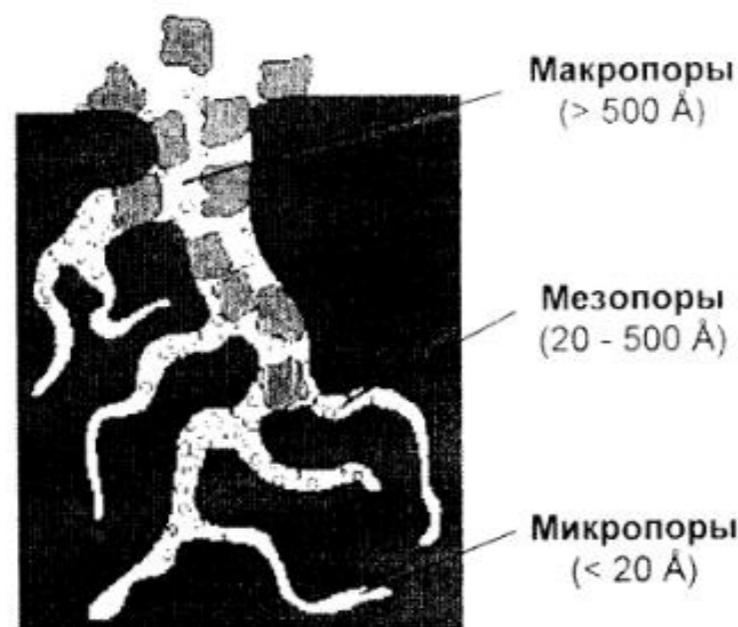
**Физическая сорбция** основана на силах межмолекулярного взаимодействия.

**Хемосорбция** основана на поглощении с образованием химических соединений на поверхности твердого тела с участием химических реакций.

**Адсорбенты** – твердые нерастворимые тела, обладающие развитой поверхностью (до  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) за счет высокой пористости.

Наиболее распространенные адсорбенты – **активные (активированные) угли** [1, 6–15, 45, 46, 79, 80, 191–198] разных марок. Активные угли представляют собой пористые углеродные тела, зерновые или порошкообразные, имеющие большую площадь поверхности. Неоднородная масса, состоящая из кристаллитов графита и аморфного углерода, определяет своеобразную пористую структуру активных углей, а также их адсорбционные и физико-механические свойства. Пористая структура активных углей характеризуется наличием развитой системы пор, которые классифицируются по размерам следующим образом:

- микропоры – с размером до  $20 \text{ \AA}$ ,
- мезопоры – с размером  $20\text{--}500 \text{ \AA}$ ,
- макропоры – с размером более  $500 \text{ \AA}$  (рис. 2.33).



**Рис. 2.33.** Схема строения активированного угля и поглощения им загрязнений

Микропоры – наиболее мелкая разновидность пор, соизмеримая с размерами адсорбируемых молекул. Удельная поверхность микропор достигает  $800\text{--}1000 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Мезопоры – поры, для которых характерно послойное заполнение поверхности адсорбируемыми молекулами, завершающееся их наполнением по механизму капиллярной конденсации. Удельная поверхность мезопор достигает  $100\text{--}200 \text{ м}^2/\text{г}$ .

Макропоры – самая крупная разновидность пор, удельная поверхность которых обычно не превышает  $0,2\text{--}0,5 \text{ м}^2/\text{г}$ . Макропоры в процес-

се сорбции не заполняются, но выполняют роль транспортных каналов для доставки вещества к поверхности адсорбирующих его пор.

Адсорбционные свойства активных углей оцениваются количеством модельного вещества, сорбированного единицей массы угля при определенных условиях, а также временем защитного действия единицы объема угля до полного его насыщения.

В основном адсорбционные свойства углей определяются микропорами, составляющими до 90% всей поверхности активного угля. На ней и протекают процессы адсорбции, в основе которых лежит взаимодействие энергетически ненасыщенных атомов углерода с молекулами адсорбируемых веществ. Лучше сорбируются вещества в молекулярной форме, хуже – в ионной. Способность органических веществ к сорбции возрастает в ряду:

гликоли < спирты < кетоны < сложные эфиры < альдегиды < недиссоциированные кислоты < ароматические соединения.

Способность к сорбции возрастает с ростом молекулярной массы и температуры.

Для оценки качества зерновых активных углей, используемых в качестве загрузки в различные типы адсорберов, важное значение имеют физико-механические характеристики, такие как: фракционный состав (зернение), насыпная плотность, механическая прочность.

По форме и размеру частиц активные угли могут быть порошкообразными, зерновыми (дробленными и гранулированными), а также волокнистыми. Порошкообразные имеют размер частиц менее  $0,1 \text{ мм}$ , зерновые – от  $0,5$  до  $5 \text{ мм}$ , волокнистые – диаметр менее  $0,1 \text{ мм}$ , а длину несколько сантиметров.

Порошкообразные активные угли используют для очистки воды однократно на городских станциях водоподготовки, вводя их во время или после коагуляции [11–14, 45, 46, 191, 197].

Зернистые угли применяются для очистки воды фильтрацией в аппаратах со сплошным слоем сорбента типа механического фильтра [1, 3–15, 45, 46, 191–196]. В зависимости от типа угля могут регенерироваться острым паром или реагентами. Однако из-за сложности организации такого процесса, больших потерь угля и невозможности полной его регенерации (только на 40–70%) обычно уголь используют однократно.

Волокнистые активные угли имеют наибольшую эффективную площадь поверхности и могут применяться в фильтрах специальной конструкции. Они нашли широкое применение в бытовых фильтрах.

Активные угли изготавливают на древесной и каменноугольной основах, а также из полимерных волокон. Процесс их производства заключается в пиролизе материала основы, т. е. его высокотемпературной обработке без доступа воздуха. Активные угли из древесного сырья затем дополнительно активируются обработкой острым паром.

Древесные угли характеризуются высокой пористостью (до 1,8–2,0 см<sup>3</sup>/г), широким распределением пор по размерам, большой удельной поверхностью и, как следствие, высокой емкостью. Однако они имеют низкую механическую прочность и удельную массу. В системах водоподготовки применяются, как правило, в бытовых и малогабаритных промышленных фильтрах.

### 2.18. Области применения активных углей производства ОАО «Сорбент»

Марка угля	Физическая форма и размер частиц	Водоподготовка		Пищевая промышленность						
		Углевание	Снаряжение фильтров высокой производительности	Снаряжение малогабаритных фильтров и фильтров доочистки	Очистка ликероводочных изделий, слабоалкогольных и газированных напитков	Очистка крахмалопаточных растворов и глюкозы	Осветление и дезодорация пищевых масел и жиров	Производство лимонной, молочной и др. кислот	Обесцвечивание сахарных сиропов, ксилита, производство карамели	
Древесные	ОУ-А	П(<0,1)	В			В		О		О
	ОУ-Б	П(<0,1)	О				О			
	ОУ-В	П(<0,1)	В				О	О	О	О
	БАУ-А	Д(1,0–3,6)			О	О				
	БАУ-МФ	Д(0,5–1,5)			В					
	БАУ-им. Ag	Д(0,5–1,5)			О					
	СПДК-27Д	П(<0,1)	О							
Каменноугольные	АГС-4	Г(2,0–3,6)			В	В				О
	АГ-3	Г(1,5–2,8)		О		В				
	АГ-5	Г(0,5–1,5)			В					
	АГ-ОВ	Г(0,5–2,8)			В	В				
	АГМ	Г(0,5–2,5)		О						
	СКД-515	Г(0,5–1,5)		О						
	СКДС-515	Г(0,5–1,5)			В					
	ДАУ	Д(1,0–6,0)		В						
КД-2	Д(0,5–1,5)		О							

П – порошок; Д – дробленый; Г – гранулированный

Применение: О – основное; В – возможное

Угли на каменноугольной основе имеют значительно лучшие гидравлические и механические характеристики, что позволяет применять их в сорберах с неподвижным и движущимся слоем любых габаритов.

Особую группу представляют новые для нашего рынка импортные активные угли, изготовленные из скорлупы кокосового ореха, например, тип 207С фирмы Sutcliffe Carbons. В них сочетаются высокая прочность, стабильный оптимальный гранулометрический состав и высокая емкость.

При адсорбции из растворов извлекаются в основном молекулы органических веществ, а также коллоидные частицы и микровзвеси. Хорошо сорбируются фенолы, полициклические ароматические углеводороды, нефтепродукты, хлор- и фосфорорганические соединения. Активные угли также используются как катализаторы разложения находящихся в воде активного хлора и озона. Эти процессы могут совмещаться с сорбцией органических веществ, повышая ее эффективность.

Соли, находящиеся в ионном виде, практически не извлекаются.

В таблице 2.18 представлен спектр применимости активных углей, производства ОАО «Сорбент» [191].

#### 2.3.3.2. Ионный обмен

**Ионный обмен** – процесс обмена ионов твердой матрицы (*ионита*) с ионами раствора.

Ионный обмен [1, 3–15, 19–40, 46, 79, 80, 198–237] является одним из основных методов очистки воды от ионных загрязнений, глубокого ее обессоливания. Наличие разнообразных ионообменных материалов позволяет решать задачи очистки вод различного химического состава с высокой эффективностью. Это единственный метод, дающий возможность выборочно, селективно извлекать из раствора некоторые компоненты, например, соли жесткости, тяжелые металлы.

**Иониты** – твердые нерастворимые вещества, имеющие в своем составе функциональные (ионогенные) группы, способные к ионизации в растворах и обмену ионами с электролитами. При ионизации функциональных групп возникают две разновидности ионов: одни жестко закреплены на каркасе (матрице) R ионита, другие – противоположного им знака (противоионы), способные переходить в раствор в обмен на эквивалентное количество других ионов того же знака из раствора.

Иониты делятся по свойствам ионогенных групп на четыре основных вида:

- катиониты;
- аниониты;
- амфолиты;
- селективные иониты.

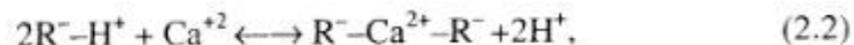
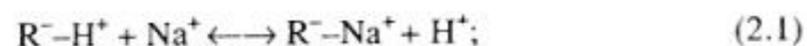
По природе матрицы их подразделяют на:

- неорганические иониты;
- органические иониты.

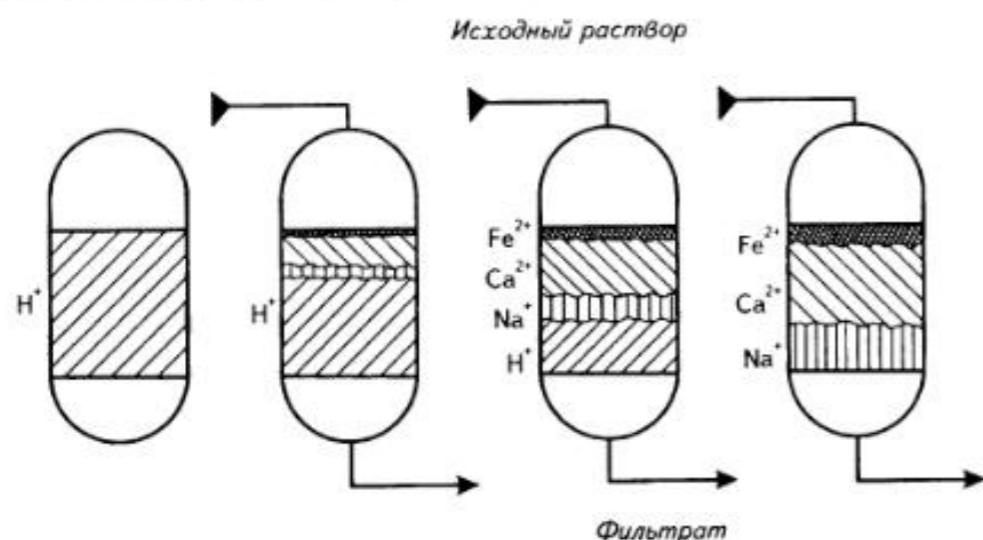
**Катиониты** – иониты с закрепленными на матрице анионами или анионообменными группами, обменивающиеся с внешней средой катионами.

Реакции ионного обмена на катионитах описываются следующими уравнениями.

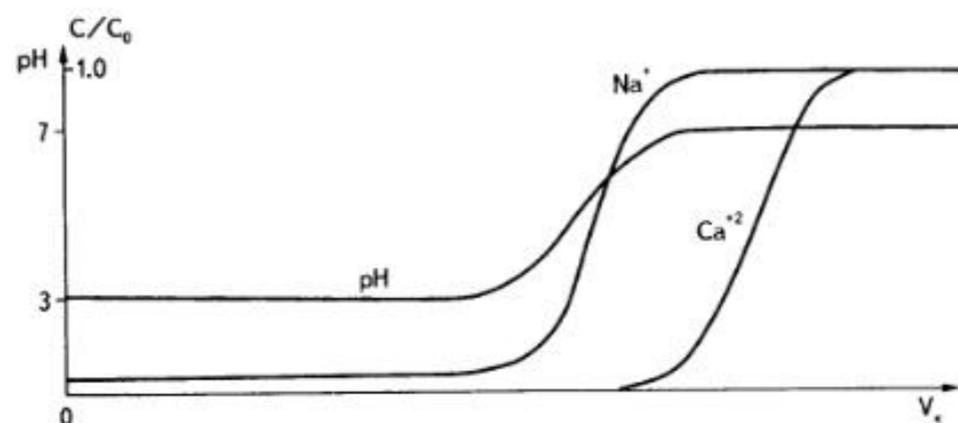
Если катионит находился в водородной  $H^+$ -форме :



то извлекаются все катионы, находящиеся в растворе. Очищенный раствор имеет кислую реакцию (рис. 2.34, 2.35).



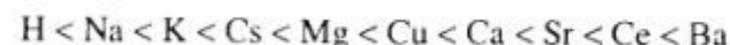
**Рис. 2.34.** Формирование в слое катионита в  $H^+$ -форме фронтов сорбции катионов



**Рис. 2.35.** Выходные кривые сорбции катионов на катионите в  $H^+$ -форме:

$C/C_0$  – отношение текущей концентрации  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  к исходной;  $V_x$  – объем раствора

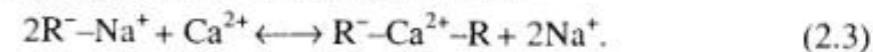
Функциональная группа катионита определяет степень его диссоциации (т. е. его кислотность) и сродство различных катионов к нему – селективность. Ряд селективности для сильноокислотного катионита КУ-2-8:



Каждый последующий член ряда сорбируется сильнее и может вытеснить предыдущий.

При движении через катионит раствора, содержащего смесь катионов, таких как Na, Ca, Mg, Fe (природная вода), происходит формирование в его слое фронтов сорбции каждого катиона и неодновременное начало проскока их в фильтрат (рис. 2.34, 2.35). Очистку заканчивают при появлении в фильтрате основного извлекаемого или контролируемого иона (рис. 2.34, 2.35). По абсциссе откладывается число т. н. колонных объемов –  $V_x$ , которые представляют собой отношение объема пропущенного раствора к объему ионита, а на ординате – значение pH и отношение концентраций компонентов в выходящем растворе к их исходным концентрациям  $C/C_0$ .

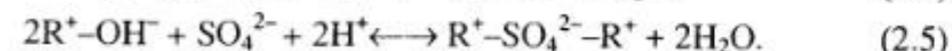
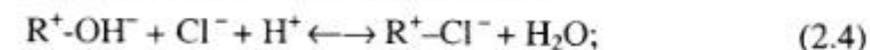
Если катионит находился в солевой  $Na^+$ -форме, то извлекаются катионы, стоящие в ряду селективности правее  $Na^+$ :



Раствор остается практически нейтральным.

**Аниониты** – иониты с закрепленными на матрице катионами или катионообменными группами, обменивающиеся с внешней средой анионами.

Если анионит находится в гидроксильной  $OH^-$ -форме, то на очистку от анионов подается, как правило, раствор после контактирования с катионитом в  $H^+$ -форме, имеющий кислую реакцию:



В этом случае извлекаются все находящиеся в растворе анионы. Очищенный раствор имеет нейтральную реакцию.

Функциональная группа анионита определяет степень его диссоциации (т. е. его щелочность) и сродство различных катионов к нему – селективность. Ряд селективности для сильноосновного анионита АВ-17-8:

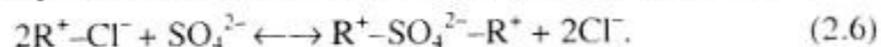


Каждый последующий член ряда сорбируется сильнее и может вытеснить предыдущий.

При пропускании через анионит раствора, содержащего смесь анионов, таких как Cl,  $SO_4$ ,  $PO_4$ ,  $NO_3$ , происходит формирование в его слое фронтов сорбции каждого иона и неодновременное начало проско-

ка их в фильтрат (рис. 2.36). Очистка заканчивается при появлении в фильтрате извлекаемого иона.

Если анионит находился в солевой  $\text{Cl}^-$ -форме, то извлекаются анионы, стоящие в ряду селективности правее  $\text{Cl}^-$ , т. е.  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ :



Раствор остается практически нейтральным.

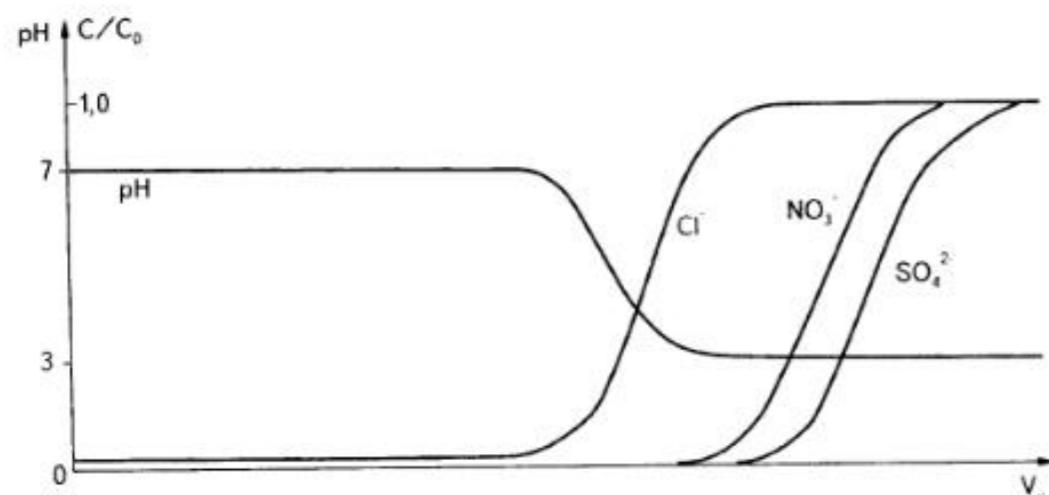


Рис. 2.36. Выходные кривые сорбции анионов на анионите в  $\text{OH}^-$ -форме

**Амфолиты** содержат закрепленные катионообменные и анионообменные группы, и в определенных условиях выступают либо как катионит, либо как анионит. Используются для переработки технологических растворов.

**Селективные иониты** содержат специально подобранные ионогенные группы, имеющие высокое сродство к какому-то одному или к группе ионов. Могут использоваться для очистки воды от определенных ионов, например, бора, тяжелых металлов или от радионуклидов.

**Основными характеристиками ионитов являются:**

- обменная емкость;
- селективность;
- механическая прочность;
- осмотическая стабильность;
- химическая стабильность;
- температурная устойчивость;
- гранулометрический (фракционный) состав.

**Обменная емкость**

Для количественной характеристики ионообменных и сорбционных свойств ионитов применяют следующие величины: полная, динамическая и рабочая обменная емкость.

**Полная обменная емкость (ПОЕ)** определяется числом функциональных групп, способных к ионному обмену, в единице массы воздушно-сухого или набухшего ионита и выражается в мг-экв/г или мг-экв/л. Она является постоянной величиной, которую указывают в паспорте ионита, и не зависит от концентрации или природы обмениваемого иона. ПОЕ может изменяться (уменьшаться) из-за термического, химического или радиационного воздействия. В реальных условиях эксплуатации ПОЕ уменьшается со временем вследствие старения матрицы ионита, необратимого поглощения ионов-отравителей (органики, железа и т. п.), которые блокируют функциональные группы.

Равновесная (статическая) обменная емкость зависит от концентрации ионов в растворе, pH и отношения объемов ионита и раствора при измерениях. Необходима для проведения расчетов технологических процессов.

**Динамическая обменная емкость (ДОЕ)** – важнейший показатель в процессах водоподготовки. В реальных условиях многократного применения ионита в цикле сорбции-регенерации обменная емкость используется не полностью, а лишь частично. Степень использования определяется методом регенерации и расходом регенерирующего агента, временем контакта ионита с водой и с регенерирующим агентом, концентрацией солей, pH, конструкцией и гидродинамикой используемого аппарата. На рисунке 2.37 показано, что процесс очистки воды прекращают при определенной концентрации лимитирующего иона, как правило, задолго до полного насыщения ионита. Количество поглощенных при этом ионов, соответствующее площади прямоугольника А, отнесенное к объему ионита, и будет ДОЕ. Количество поглощенных ионов, соответствующее полному насыщению, когда проскок равен 1, соответствующее сумме ДОЕ и площади заштрихованной фигуры над S-образной кривой, называют полной динамической обменной емкостью (ПДОЕ). В типовых процессах водоподготовки ДОЕ обычно не превышает 0,4–0,7 ПОЕ.

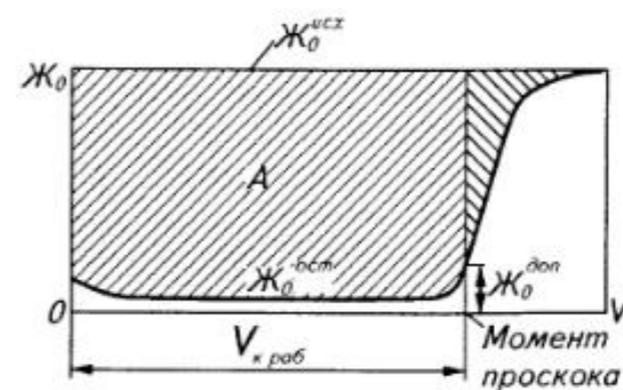


Рис. 2.37. Сравнение полной динамической ПДОЕ и динамической обменной емкости ДОЕ. Заштрихованная площадь А соответствует ДОЕ, а вся площадь над кривой с учетом проскока солей – ПДОЕ

**Селективность.** Под селективностью понимают способность избирательно сорбировать ионы из растворов сложного состава. Селек-

тивность определяется типом ионогенных групп, числом поперечных связей матрицы ионита, размером пор и составом раствора. Для большинства ионитов селективность невелика, однако разработаны специальные образцы, имеющие высокую способность к извлечению определенных ионов.

**Механическая прочность** показывает способность ионита противостоять механическим воздействиям. Иониты проверяются на истираемость в специальных мельницах или по весу груза, разрушающего определенное число частиц. Все полимеризационные иониты имеют высокую прочность. У поликонденсационных она существенно ниже. Увеличение степени сшивки полимера повышает его прочность, но ухудшает скорость ионного обмена.

**Осмотическая стабильность.** Наибольшее разрушение частиц ионитов происходит при изменении характеристик среды, в которой они находятся. Поскольку все иониты представляют собой структурированные гели, их объем зависит от содержания, pH среды и ионной формы ионита. При изменении этих характеристик объем зерна изменяется. Вследствие осмотического эффекта объем зерна в концентрированных растворах меньше, чем в разбавленных. Однако это изменение происходит не одновременно, а по мере выравнивания концентраций «нового» раствора по объему зерна. Поэтому внешний слой сжимается или расширяется быстрее, чем ядро частицы; возникают большие внутренние напряжения и происходит откалывание верхнего слоя или раскалывание всего зерна. Это явление называется «осмотический шок». Каждый ионит способен выдерживать определенное число циклов таких изменений характеристик среды. Это называется его осмотической прочностью или стабильностью.

На рисунке 2.38 показано, как изменяется объем разных ионитов в растворах солей и кислот. Наибольшее изменение объема происходит у слабокислотных катионитов. Наличие в структуре зерен ионита макропор увеличивает его рабочую поверхность, ускоряет перенабухание и дает возможность «дышать» отдельным слоям. Поэтому наиболее осмотически стабильны сильнокислотные катиониты макропористой структуры, а наименее – слабокислотные катиониты.

Осмотическая стабильность определяется как количество целых зерен, отнесенное к общему первоначальному их числу, после многократной (150 раз) обработки навески ионита попеременно в растворе кислоты и щелочи с промежуточной отмывкой обессоленной водой.

**Химическая стабильность.** Все иониты обладают определенной стойкостью к растворам кислот, щелочей и окислителей. Все полимеризационные иониты имеют большую химическую стойкость, чем поликонденсационные. Катиониты более стойки, чем аниониты. Среди

анионитов слабоосновные устойчивее к действию кислот, щелочей и окислителей, чем сильноосновные.

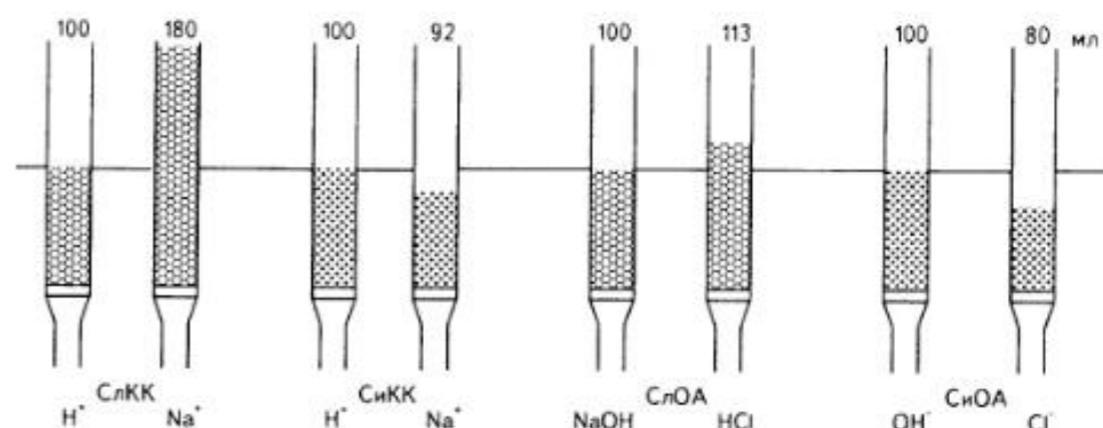


Рис. 2.38. Изменение объема разных ионитов в зависимости от их солевой формы

По устойчивости к действию  $\text{HNO}_3$  отечественные катиониты в Н-форме можно расположить в следующий ряд:

КБ-4П-2, СГ-1 > КУ-2-8 > КУ-1.

Из анионитов наибольшая устойчивость оказалась у АВ-17 и АМ, АМП, которые не изменили емкость при контакте в течение 5 месяцев с 7–8 н  $\text{HNO}_3$ . Однако все указанные иониты окисляются концентрированными растворами перманганата, бихромата, озона и активного хлора. Катионит КУ-2-8 устойчив к перекиси водорода и слабым растворам, содержащим активный хлор.

**Температурная устойчивость** катионитов выше, чем анионитов. Слабокислотные катиониты работоспособны при температуре до  $130^\circ\text{C}$ , сильнокислотные типа КУ-2-8 – до  $100\text{--}120^\circ\text{C}$ , а большинство анионитов – не выше  $60$ , максимум  $80^\circ\text{C}$ . При этом, как правило, Н- или ОН-формы ионитов менее стойки, чем солевые.

**Фракционный состав.** Синтетические иониты полимеризационного типа производятся в виде шарообразных частиц с размером в диапазоне от  $0,3$  до  $2,0$  мм. Поликонденсационные иониты выпускаются в виде дробленых частиц неправильной формы с размером  $0,4\text{--}2,0$  мм. Стандартные иониты полимеризационного типа имеют размер от  $0,3$  до  $1,2$  мм. Средний размер полимеризационных ионитов составляет от  $0,5$  до  $0,7$  мм (рис. 2.39). Коэффициент неоднородности не более  $1,9$ . Этим обеспечивается приемлемое гидравлическое сопротивление слоя. Для процессов, когда иониты использовались в псевдооживленном слое, в СССР они выпускались в виде 2 классов по крупности: класс А с размером  $0,6\text{--}2,0$  мм и класс Б с размером  $0,3\text{--}1,2$  мм.

За рубежом по специальным технологиям выпускают иониты моно-сферного типа Purofine, Amberjet, Marathon, имеющие частицы с очень малым разбросом размеров:  $0,35 \pm 0,05$ ;  $0,5 \pm 0,05$ ;  $0,6 \pm 0,05$  (рис. 2.39). Такие иониты имеют более высокую обменную емкость, осмотическую и механическую стабильность. Слои моно-сферных ионитов имеют меньшее гидравлическое сопротивление, смешанные слои таких катионита и анионита значительно лучше разделяются.

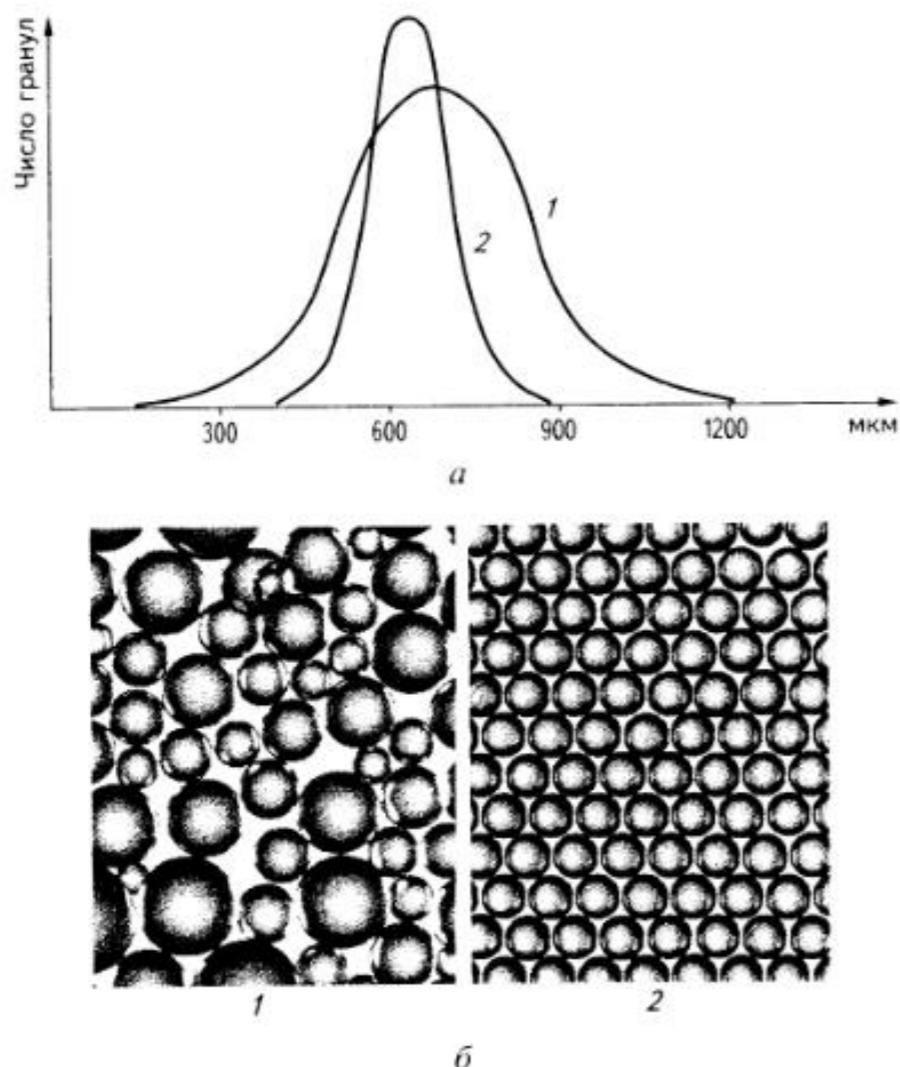


Рис. 2.39. Кривые распределения частиц по размеру для стандартного (1) и моно-сферного (2) ионитов (а) и фотографии таких ионитов (б)

### Виды ионитов

Иониты разделяются по материалу матрицы на неорганические и органические. Те, в свою очередь, подразделяются на природные и синтетические.

### Неорганические иониты

В основном являются катионитами. Могут быть природными и синтетическими.

#### Природные неорганические иониты

Ряд природных материалов обладает ионообменными свойствами.

Поскольку химическая стойкость в кислотах и щелочах таких минералов незначительна, они используются только в солевой форме и не регенерируются. Наибольшую сорбционную способность имеют алюмосиликаты: глины, цеолиты (вермикулит, клиноптилолит, бентонит и др.).

**Цеолиты** – кристаллические алюмосиликаты с трехмерной «каркасной» решеткой. Объем каналов и пустот, пронизывающих весь кристалл, может достигать 50% его объема. Цеолиты – типичные макропористые сорбенты.

**Глины** имеют слоистую решетку, состоящую из кремнекислородных тетраэдров и алюмокислородных октаэдров, наложенных друг на друга и образующих элементарный пакет.

Для повышения обменной емкости природных материалов они часто подвергаются дополнительной обработке кислотой, паром, обжигу.

Благодаря своей структуре цеолиты и глины обладают свойствами селективности.

Для глинистого монтмориллонита ряд селективности:



Полная обменная емкость неорганических сорбентов существенно ниже, чем у синтетических. Однако их доступность и низкая стоимость дает возможность применять их однократно на водоподготовительных станциях для очистки от радионуклидов и коррекции солевого состава.

#### Синтетические неорганические иониты

Синтетические неорганические иониты производятся либо путем синтеза нового материала, либо модификацией природного материала путем прививки к нему функциональных групп. Основное направление – создание высокоселективных ионитов. Так, прививкой ферроцианидных групп к различным носителям (цеолиты, угольные волокна и т. п.) получают иониты, высокоселективные к радионуклидам  $\text{Cs}^{134,137}$ . Для извлечения радионуклидов  $\text{Sr}^{90}$  синтезированы сорбенты на основе фосфатов или гидроксидов титана и циркония, гидратированной двуокиси марганца и т. д.

В настоящее время опытно-промышленными партиями выпускаются сорбенты НЖА и НЖС (они же под названием «Феникс») на основе цеолитов, FM на основе угольных волокон, а также серия сорбентов «Термоксид» на основе оксидов и фосфатов циркония.

При обработке вод с содержанием около 0,5 г/л, типа природной, содержащих радионуклиды  $Cs^{134,137}$ , они обеспечивают очистку 30000–150000 объемов на 1 объем сорбента до норм СанПиН 2.1.4.10749-01 и НРБ-99.

### Органические иониты

Органические иониты практически все синтетические. Природных аналогов нет. Они имеют высокую химическую стойкость, практически не растворимы.

По термической и радиационной стойкости уступают неорганическим. По обменной емкости, скорости ионного обмена, химической стойкости, номенклатуре и широте применения значительно превосходят их.

В мире разработаны и выпускаются десятки марок ионитов различных типов (табл. 2.19).

Органические иониты различаются:

- по природе ионогенных групп:
  - катиониты;
  - аниониты;
  - амфолиты, селективные-комплексобразующие;
- по силе ионизации ионогенных групп:
  - сильно диссоциирующие;
  - средне диссоциирующие;
  - слабо диссоциирующие;
- по материалу матрицы:
  - полимеризационные (полистирольные, полиакриловые, поливинилпиридиновые);
  - поликонденсационные (фенол-формальдегидные, полиэтилен-полиаминные).
- по типу матрицы:
  - гелевые;
  - макропористые;
  - волокна.

Органические иониты полимеризационного типа (полистирольные, полиакриловые), составляющие более 90% выпуска, изготавливаются в виде шарообразных частиц с размером в диапазоне от 0,3 до 2,0 мм. Поликонденсационные иониты (фенолформальдегидные, полиэтиленполиаминные и т. п.) выпускаются в виде дробленых частиц размером 0,4–2,0 мм. Иониты также могут быть выполнены в виде волокон или гранулятов.

2.19. Ионообменные смолы: аналоги различных производителей

Ионит	Матрица		Структура	Россия, Украина	Purolite	Rohm & Haas		Dow Chemical		Nitro-chemia	Bayer	Granion	Thermax	
	С	А				Amberlite	Ambersep	IMAC	Dowex					Kastel*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
КТ	Сп	С	Г	КУ-2-8 КУ-2-8ФСД	С-100, С-100Е С 100×10	IR 120H, Na SR1LNa		HP 1110	HCR- S/S, HCR-S, HCR-W2, HGR- W2	C-300* C-300P*	KS	S100	K001-8 K001-7 K001-10	T-40 T-42
		С	МП	КУ-23	С 150 С 145 С 160	252H, Na 200C Na	252H 200H		CM 15, 88	C- 300P*	KSM	SP 112	D001	T-42MP
		С	Моно, Г		Purofine, SGC 650	Amberjet: 1200 1500 1600			Marathon C.C-10, UPCORE MonoC-600, Monosphere 575C, 650C, 750C, C-350, C-400					
	Сл	С	Г	КБ-4	С 105	IRC 86			MAC-3	C101*	KCO	CPN 80		CXO-9
		А	МП	КБ-2-10П КБ-4-10П	С 104 С 106	IRC 76 IRC 50		HP 333 HP336					D113-III	
АН	Сп	С	Г	АВ-17-8	А 400 А 600	IRA 402Cl IRA 405Cl			SBR-P, SBR, Dowex I	A500*	AT-400 AT-660 AP	M 511 M 510 M 504	D201-4 D201-7 D202-II	A-23 A-25 A-27
			МП	АВ-17-10П АВ-17-2П	А 500 А 500P А 505	IRA 900Cl	900 OH 900 SO <sub>4</sub>		MSA-1		ATM	MP 500	DOC2001	A-27MP

Продолжение таблицы 2.19

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
			Г	-	A 200 A 300	IRA 410 CI			SAR*	A300 *	AD	M 610	-	A-32, 34, 36
			МП	AB-29-12П	A 510	IRA 910 CI			MSA-2		ADM	MP 600	11202-2	A-36MP
		А	Г	-	A 850	IRA 458 CI IRA 478 CI								A-27MP
			МП	-	A 860 A 870	IRA 958 CI								
Сл	А		Г	АН-31 ЭДЭ-10П	A 845	IRA 67 IRA 70RF			WGR-2 *		ADA	OC 1072	-	A-10x
		С	МП	АН-511 АН-18-10П	A 100 A 105	IRA 96	HP 661		MWA-1		ADA M	MP 62 MP 64	D-301-III	A-2Xmp
		А	МП	-	A 830								D-311	
Си	С		Моно, Г		Purofine, SGA 550	Amberjet: 4200 CI 4400 OH, CI 4600 CI 9000 OH			Marathon A, A2, 11, UP- CORE Mono A-625 A-500, A2-500 Monosphere 550 A, 700 A					
КТ	Ядерного класса для сверх- чистой воды		Г	КУ-2-8чс КУ-2-8чс AB-17-8чс, як AB-17-8жк	NRW 100 NRW 150 NRW 600 NRW 400	IRN 77 IRN97 H IRN 99 IRN 78			HCR-S*, HGR NG, Monosphere575CNG/UPW, 650CNG/UPW 550 A LC NG/UPW		KSN ATN	S 100 KR/H M 500KR/OH		MP-200

Продолжение таблицы 2.19

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Селективные		МП	-	S 108 S 920 S 930 S 940 S 950	IRC 743 GT 73		HP 555	C-75 NG			TR 214 TR 207 TR 208 VPOC 1080	D-401 D-402 D-403 D-405 D-406 D-407	
	Специальные			КУ-23СМ КУ- фторатор	C 100E Ag C 150E Ag	XAD 4 XAD16								
	Смесь ионитов			-	MB 400 MB 450 MB 460 MB 476	MB 9L MB 20 IRN 150 IRN 160 IRN 170			MB-50, MR-3 LC NG, MP-5 LC*, MR-72 LC NG, MR-75 LC NG, Marathon MR-3, Monosphere MR-3 UPW, MR- 450 UPW, MR-575 UPW					
	Инертный материал			-	IR-1, IR-2, IR-4, IR-5	RF 14			600BB, IF-56, UPCORE IF-62			IN 42		TA-100

Тип ионита: Си – сильный, Сл – слабый.

Материал матрицы: С – стирольная, А – акриловая.

Тип матрицы: Г – гелевая, МП – макропористая.

\* Данная марка более не выпускается

Все типы ионитов могут разделяться по назначению на:

- технические;
- пищевые;
- специальные.

Различие состоит в основном в степени отмывки продукта от лимитирующих данное применение примесей и (или) в переводе в заданную солевую форму.

В ряде случаев (для работы в псевдооживленном слое, смешанном слое катионита и анионита, для противоточной регенерации, для послойной загрузки и т. п.) специально производятся или отсеиваются из товарного продукта иониты определенного гранулометрического состава.

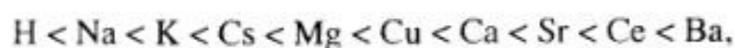
### Катиониты

В зависимости от силы ионогенной группы различаются сильно-, средне- и слабокислотные катиониты, которые могут работать в различных условиях (табл. 2.20).

#### 2.20. Основные характеристики отечественных катионитов

Степень диссоциации	Тип ионогенных групп	Рабочий диапазон pH	Марка ионита	Дополнительные характеристики	
Сильнокислотный	-SO <sub>3</sub> H <sup>+</sup>	1–14	КУ-2-8	Технический	Гелевый, Na-форма
			КУ-2-8чс КУ-2-8як	Чистый Особочистый	Гелевый, H-форма
			КУ-23	Технический	Макропористый, Na-форма
Среднекислотный	-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> = P <sup>-</sup>	3–14	КФ-7 СФ-5	Технический	Na-форма, макропористый
Слабокислотный	-COO <sup>-</sup>	6–14	КБ-2 КБ-4 КБ-4-10П СГ-1м	Технический	Na-форма, макропористый

Сильнокислотные сульфокатиониты сорбируют все катионы металлов из раствора, поэтому их называют универсальными – марка КУ. Они работают при pH раствора от 0 до 14, но наиболее эффективны при pH раствора от 2 до 14. Ряд селективности для стандартного катионита типа КУ-2-8:



хотя реальная селективность невелика.

Соответственно с рядом селективности для вытеснения из катионита сорбированных катионов из правой части ряда, т. е. для их регене-

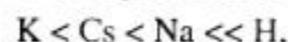
рации, необходимо использовать только достаточно концентрированные растворы либо кислот, либо солей натрия и калия, взятых с большим избытком по сравнению со стехиометрическим количеством.

К сульфокислотным катионитам относится и сульфоуголь, представляющий собой продукт обработки дробленых частиц угля концентрированной серной кислотой. Поскольку сульфированию подвергаются разные органические группы, составляющие каркас угля, он имеет свойства сильно- и среднекислотного катионита. Сульфоуголь – это первый промышленный катионит. По сравнению с современными синтетическими катионитами он обладает низкой емкостью (порядка 500–700 мг-экв/л), прочностью и требует больших расходов регенерационных агентов и промывной воды. Единственное его достоинство – низкая цена, за которую расплачиваются большими эксплуатационными расходами. Выпускается только в РФ и КНР.

**Среднекислотные фосфорнокислотные катиониты** обладают селективностью к ионам водорода и поливалентных металлов. Могут использоваться для очистки разбавленных и концентрированных растворов от поливалентных металлов. Их емкость и ряд селективности сильно зависят от pH раствора. Легко регенерируются слабыми растворами кислот. В водоподготовке не применяются.

Серийно в РФ не выпускаются.

**Слабокислотные карбоксильные катиониты** [5, 37, 198–201, 217, 228–235] обладают высокой селективностью к ионам водорода и поливалентных металлов. Ряд селективности зависит от pH и по сравнению с сильнокислотными катионитами имеет обращенный вид. Для карбоксильного пористого катионита типа КБ-4-10п и однозарядных ионов:

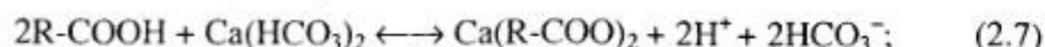


а для двухзарядных ионов:



Ион водорода легко вытесняет все другие катионы, и такие иониты могут эффективно работать только в щелочной среде при pH раствора от 7 до 14.

При ионном обмене протекают следующие реакции, результатом которых является образование низкодиссоциирующих продуктов – воды и углекислого газа, либо pH не меняется:





Они могут регенерироваться практически стехиометрическим количеством кислоты.

Используются для умягчения воды со снижением ее щелочности (раздел 3.3), а также для извлечения тяжелых металлов.

### Аниониты

В зависимости от силы ионогенной группы различаются сильно-, средне- и слабоосновные аниониты, которые могут работать в различных условиях (табл. 2.21).

#### 2.21. Основные характеристики отечественных анионитов

Степень диссоциации	Тип ионогенных групп	Рабочий диапазон pH	Марка ионита	Дополнительные характеристики	
Сильно-основный	Четвертичные аминогруппы	0–14	AB-17-8 AM, АМП	Технический	Гелевый, Cl-форма
			AB-17-8чс	Чистый	Гелевый, ОН-форма
			AB-17-8як	Особочистый	
			AB-17-п AM-п	Технический	Макропористый, Cl-форма
Средне-основный	Третичные и четвертичные аминогруппы = R <sup>+</sup>	0–5	АН-31 ЭДЭ-10П	Технический, поликонденсационный	Cl-форма, макропористый
Слабо-основный	Вторичные и третичные аминогруппы	0–7	АН-2ф	Технический, поликонденсационный,	Cl-форма,
			АН-221	полимеризационный	макропористый

**Сильноосновные аниониты** сорбируют все анионы солей из раствора. Они работают при pH раствора от 0 до 14, но наиболее эффективны при pH раствора от 0 до 10. Ряд селективности для стандартного анионита типа AB-17-8:



хотя реальная селективность невелика.

Соответственно они могут регенерироваться только достаточно концентрированными растворами щелочей либо растворимых фторидов, карбонатов или хлоридов, взятых с большим избытком по сравнению со стехиометрическим количеством.

Используются в основном для доочистки воды от анионов слабых кислот. При работе в Cl-форме могут поглощать из воды такие анионы, как  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Необратимо поглощают природные органические кислоты, что постепенно существенно снижает их рабочую емкость.

**Среднеосновные аниониты** как правило бифункциональны. Поэтому они сорбируют в основном анионы сильных кислот, но в незначительных количествах могут поглощать и анионы слабых кислот. Обладают большей, чем сильноосновные, обменной емкостью. В определенных условиях обладают селективностью к ионам поливалентных металлов. Их емкость и ряд селективности сильно зависят от pH раствора.

Имеют высокое сродство к гидроксил-ионам. Поэтому могут регенерироваться разбавленными растворами щелочей, взятых с небольшим избытком по сравнению со стехиометрическим количеством.

Используются совместно с катионитом для обессоливания воды.

**Слабоосновные аниониты** сорбируют анионы только сильных кислот. Обладают значительно большей, чем сильноосновные, обменной емкостью, но худшими кинетикой обмена, химической и механической прочностью. Их емкость и ряд селективности сильно зависят от pH раствора.

Имеют высокое сродство к гидроксил-ионам. Поэтому могут извлекать анионы только из кислых сред и регенерируются разбавленными растворами щелочей, взятых практически в стехиометрическом количестве.

Ряд таких смол, прежде всего на основе полиакрилатов, обладает способностью обратимо поглощать природные органические кислоты, что дает возможность использовать их как органопоглощители (скавенжеры) [223–226, 233].

Используются совместно с катионитом для обессоливания воды.

### Селективные иониты

Многие ионогенные группы (на основе тиомочевины, иминоуксусные, аминофосфорные) склонны к образованию комплексов с многовалентными металлами. Большинство селективных ионитов – аниониты или амфолиты. Так, стандартный анионит ЭДЭ-10п обладает высокой емкостью по меди. Специальный хелатный амфолит АНКБ-35 имеет по сравнению с КУ-2-8 обращенный ряд селективности и может сорбировать тяжелые металлы, не извлекая Ca и Mg.

Серийно в РФ не выпускаются.

### Регенерация ионитов

Поскольку реакции (2.1–2.3, 2.4–2.6) обратимые, имеется возможность, обрабатывая насыщенный ионит раствором, содержащим наиболее легкие ионы  $\text{Na}^+$  или  $\text{H}^+$  для катионита (т. е. кислоту или соль) и  $\text{OH}^-$  или  $\text{Cl}^-$  для анионита (т. е. щелочь или соль) в высокой концентрации, вытеснить из него сорбированные ионы и восстановить его сорбционную (поглотительную) способность [1, 3, 6, 8, 198–213, 220, 221, 227, 229–233, 237].

Эффективность регенерации слабо и сильно диссоциированных ионитов существенно различается. Как отмечалось выше, слабо диссоциированные иониты могут быть регенерированы практически без избытка кислоты или щелочи. Сильно диссоциированные иониты требуют обязательного избытка. Чем выше желательная степень регенерации и, следовательно, рабочая емкость, тем больше должен быть этот избыток (рис. 2.40).

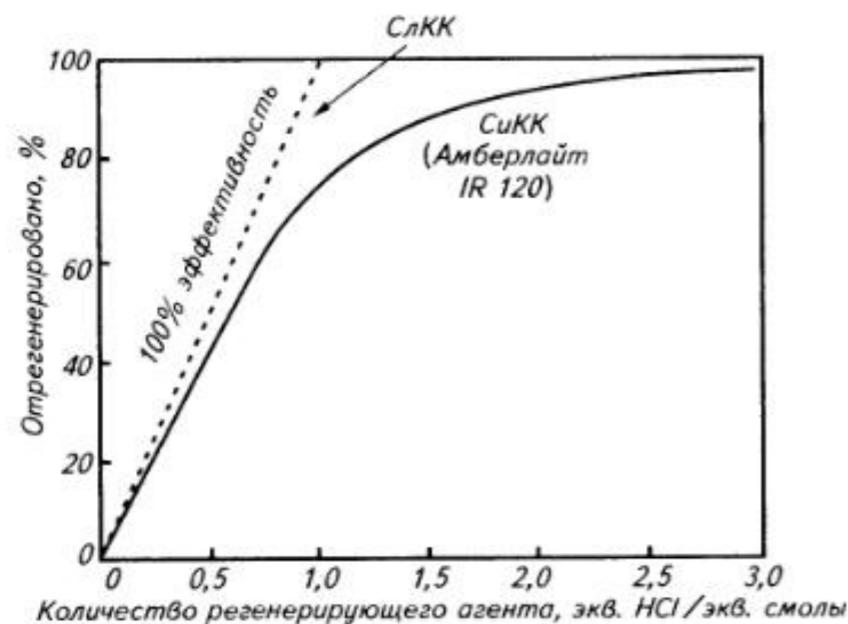


Рис. 2.40. Зависимость степени регенерации сильно- (СиКК) и слабокислотного (СлКК) катионита от расхода кислоты

Регенерация может проводиться при движении регенерирующего раствора через слой ионита в том же направлении, что очищаемый раствор — **прямоточная регенерация**, или в противоположном — **противоточная регенерация**.

Параллельноточная (прямоточная) регенерация (рис. 2.41, б) наиболее просто осуществима, поэтому и наиболее распространена. Однако для достаточно полного вытеснения всех катионов из слоя ионита она требует существенного (2–3-кратного) избытка регенерирующего агента. Из-за «размазывания» наиболее сорбируемых ионов по слою ионита, они оказываются в нижней части его слоя, там, где из него выходит очищенная вода; качество очистки, особенно в первое время, оказывается недостаточно высоким.

Противоточная регенерация (рис. 2.41, в) реализуется сложнее (см. ниже). Она может производиться с минимальным расходом реагентов (избыток от 1,1) и объемом отходов. Поскольку очищаемый раствор на выходе из фильтра контактирует с наиболее регенерированным ионитом, качество очистки максимально.

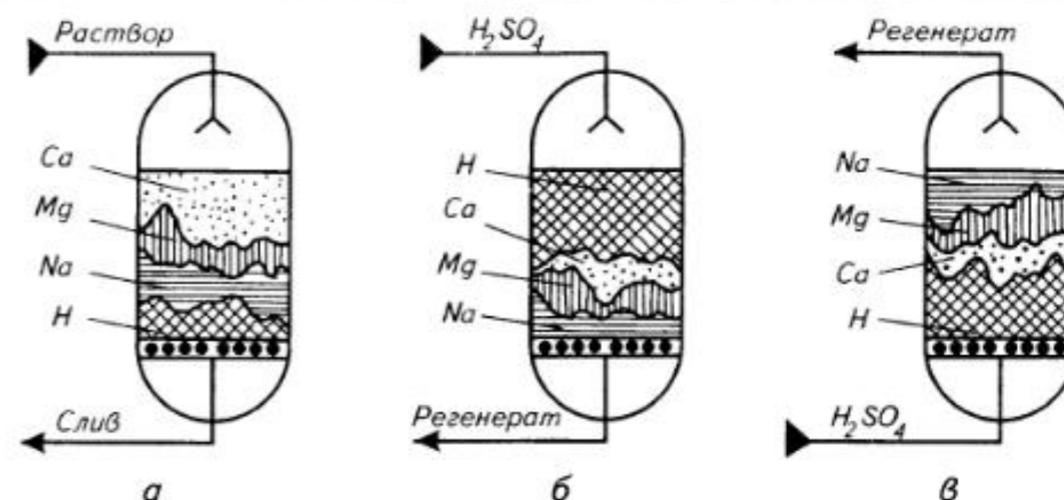


Рис. 2.41. Распределение ионов в слое катионита при сорбции (а), прямоточной (б) и противоточной (в) регенерации

### Ионообменное оборудование

Эффективность очистки воды и объем отходов, удобство и безопасность обслуживания в значительной мере определяется аппаратным оформлением процесса.

Разработаны сотни видов ионообменных аппаратов различного типа периодического и непрерывного действия, со сплошным и псевдооживленным слоями ионитов [1, 3–9, 47–50, 198–216, 220, 221, 233].

Для водоподготовки используются наиболее простые, дешевые и надежные аппараты, требующие минимального обслуживания. Их технологические характеристики не всегда оптимальны. Однако требования простоты обслуживания и надежности преобладают над экономичностью.

В отечественной промышленности применяются только аппараты периодического действия со сплошным слоем ионита типа фильтр. При этом на Западе для подготовки воды для ТЭС уже более 30 лет, а в России в урановом производстве более 50 лет успешно работают высокоэффективные аппараты и установки непрерывного ионного обмена [203, 206, 207, 213–216].

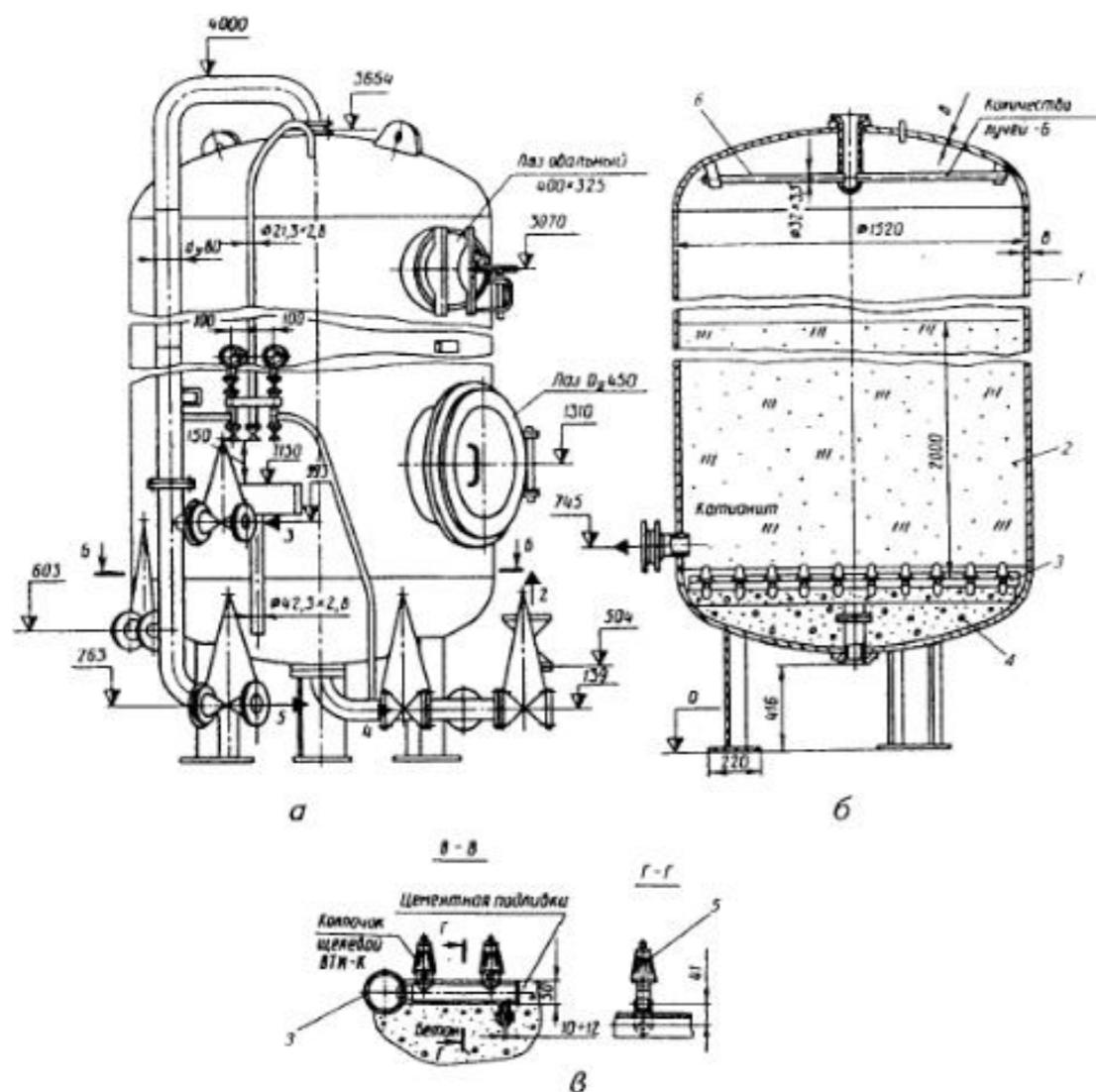
### Аппараты периодического действия

Аппараты периодического действия [1, 3–9, 47–50, 198–216, 220, 221, 233] характеризуются тем, что все технологические процессы (очистка, взрыхление, регенерация, отмывка) проводятся в одном аппарате. В отечественной водоподготовке используются только аппараты со сплошным слоем ионитов — **фильтры**. По направлению взаимного движения очищаемого и регенерирующего растворов они могут быть **прямоточными** (параллельноточными) и **противоточными** (противопоточными).

Для сокращения объема отходов (регенератов) используют схемы с фракционированием регенерата и промывных вод.

### Прямоточные фильтры

Прямоточные (параллельноточные) фильтры [1, 3–9, 47–50, 198–216, 220, 221, 233] – это наиболее простые аппараты (рис. 2.42), состоящие из корпуса 1, снабженного верхним распределительным устройством 6 и нижним дренажным устройством. Последнее представляет из себя коллектор 3 с дренажными колпачками 5 или выполненное из перфорированных дренажных труб. Внутри корпуса находится слой ионита 2. Он не должен превышать по высоте 0,5–0,7 высоты фильтра, так чтобы при периодическом взрыхлении слоя, когда он расширяется, не было уноса и потерь ионита.



**Рис. 2.42.** Стандартный параллельноточный натрий-катионитный фильтр первой ступени ФИПаI-1.5-0.6-Na:

*а* – внешний вид; *б* – разрез; *в* – нижнее колпачковое дренажное устройство; 1 – корпус; 2 – ионит; 3 – коллектор; 4 – бетон; 5 – колпачок; 6 – распределитель

Рядом с фильтром на подводящих трубопроводах устанавливается запорная арматура с ручным, гидро- или электроприводом. Схема обвязки показана в разделе «Установки».

Технологические показатели таких аппаратов наилучшие.

Работа фильтра состоит из следующих операций:

- очистка воды;
- взрыхление для удаления взвесей;
- регенерация ионита;
- отмывка.

Режимы проведения всех операций рассмотрены ниже.

Отечественной промышленностью серийно выпускаются прямо-точечные фильтры диаметром 1,0; 1,5 м на Бийском котельном заводе (БиКЗ) [50] и диаметром 2,0; 2,6; 3,0; 3,4 м на Таганрогском котельном заводе (ТКЗ) «Красный котельщик» [49]. Их параметры приведены в таблице 2.22. Ряд заводов химического машиностроения выпускает корпуса фильтров из углеродистой или нержавеющей стали под заказ.

Характеристики корпусов из полимерных материалов, выпускаемых зарубежными фирмами, аналогичны с корпусами для механических фильтров и приведены в табл. 2.3.

Дренажные устройства идентичны с применяемыми для механических фильтров (раздел 2.1.2). Для фильтров, работающих с кислотой и щелочью, используются полимерные коллекторы и колпачки. Использование нержавеющей стали не оправдано, поскольку при ее неизбежном медленном растворении кислотой происходит разрушение дренажных отверстий и последующий унос ионита.

Блоки управления для ионообменных фильтров близки по конструкции к блокам для механических фильтров, отличаясь введением дополнительных операций подсоса соли или кислоты (щелочи) и, соответственно, внутренних эжекторов, и для процессов умягчения, заполнения умягченной водой бака солерастворителя. Внешне блоки управления практически идентичны. Для процессов обессоливания применяются блоки, имеющие клапана из полимерных материалов, стойких к кислоте и щелочи. Параметры блоков управления приведены в таблице 2.5.

Все бытовые ионообменные фильтры выполнены с прямотоком фаз. Они имеют корпуса из пластика или нержавеющей стали. Некоторые отечественные организации используют импортные корпуса из оцинкованного металла, что недопустимо, поскольку соль съедает цинковое покрытие практически сразу, а толщина таких корпусов незначительна. В большинстве случаев используются импортные комплектующие. Так же, как для механических фильтров, корпуса имеют размеры, указанные в таблице 2.3. Дренажные системы также аналогичны. В отличие от отечественных фильтров, в импортных бытовых и промышленных фильтрах

устанавливаются верхние дренажи, которые предотвращают унос смолы при взрыхлении с интенсивностью большей, чем расчетная.

### 2.22. Основные параметры ионообменных фильтров ТКЗ и БиКЗ\*

Обозначение	Производитель	Диаметр, мм	Высота, мм	Масса, кг	Производительность, м <sup>3</sup> /ч
ФИПаI-1.0-0.6-Na-1	БиКЗ	1000	3750	805	24
ФИПаII-1.0-0.6-Na-1	БиКЗ	1000	3035	739	48
ФИПаI-1.0-0.6-H-1	БиКЗ	1000	3640	899	24
ФИПаII-1.0-0.6-H-1	БиКЗ	1000	2968	831	48
ФИПаI-1.4-0.6-Na-2	БиКЗ	1400	3635	1140	24
ФИПаII-1.4-0.6-Na-2	БиКЗ	1400	2915	1104	48
ФИПаI-1.4-0.6-H-2	БиКЗ	1400	3665	1464	24
ФИПаII-1.4-0.6-H-2	БиКЗ	1400	2945	1437	48
ФИПа-I-1.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	1000	3780	1190	20
ФИПа-I-1.5-0.6-ВИФР	ТКЗ	1500	3785	1750	40
ФИПа-I-2.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	2000	4630	2670	80
ФИПа-I-2.6-0.6-ВИФР	ТКЗ	2600	4950	4065	130
ФИПа-I-3.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	3000	5210	5275	180
ФИПа-I-3.4-0.6-ВИФР	ТКЗ	3400	5490	6490	220
ФИПа-II-1.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	1000	3085	1090	40
ФИПа-II-1.5-0.6-ВИФР	ТКЗ	1500	3190	1590	90
ФИПа-II-2.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	2000	4430	2190	150
ФИПа-II-2.6-0.6-ВИФР	ТКЗ	2600	3800	3540	250
ФИПа-II-3.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	3000	4180	4920	350
ФИПр-2.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	2000	4910	3530	157
ФИПр-2.6-0.6-ВИФР	ТКЗ	2600	5230	5820	265
ФИПр-3.0-0.6-ВИФР	ТКЗ	3000	6120	8320	350
ФИПр-3.4-0.6-ВИФР	ТКЗ	3400	6090	1033	450
ФИСДВр-2.0-1.0	ТКЗ	2000	4740	3670	160
ФИСДНр-2.0-1.0	ТКЗ	2000	3780	3050	300
ФИСДНр-2.6-1.0	ТКЗ	2600	4245	4570	500
ФИСДНр-3.4-1.0	ТКЗ	3400	4840	8140	900

\*По данным заводов-изготовителей.

\*\*Все фильтры рассчитаны на давление 0,6 МПа и температуру до 40 °С.

ФИПаI – фильтр ионитный прямоточный 1 ступени;

ФИПаII – фильтр ионитный прямоточный 2 ступени;

ФИПр – фильтр ионитный противоточный;

ФИСДВр – фильтр смешанного действия с внутренней регенерацией;

ФИСДНр – фильтр смешанного действия с выносной регенерацией.

Типичные характеристики ионообменных фильтров, собранных из импортных комплектующих, приведены в таблице 2.23.

### 2.23. Основные параметры ионообменных фильтров на базе зарубежных комплектующих

Модель – размер корпуса, дюйм – тип блока управления	Габаритные размеры, высота/диаметр, мм		Присоединительные размеры, вход/выход/дренаж, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Объем фильтрующего материала, л	Подача воды на промывку, не менее, м <sup>3</sup> /ч	Объем воды на регенерацию, м <sup>3</sup>
	Фильтр	Солеумягчитель					
ФИП - 0844-560	1300/210	650/410	20/20/15	0,8/1,2	25	0,6	0,25
ФИП - 1054-560	1560/260	650/410	20/20/15	1,3/2,0	50	0,6	0,40
ФИП - 1248-560	1450/310	650/410	25/25/15	1,8/2,0	75	1,0	0,65
ФИП - 1354-251	1550/330	650/410	25/25/20	2,0/2,6	60	1,0	0,65
ФИП - 1465-251	1875/370	1020/530	25/25/15	2,5/4,0	95	1,2	0,8
ФИП - 1665-251	1880/410	1020/530	25/25/20	3,0/4,5	115	1,6	1,0
ФИП - 1865-275	1820/470	1110/740	25/25/20	4,0/6,0	160	2,2	1,4
ФИП - 2160-285	1920/560	1110/740	40/40/25	6,5/8,0	175	2,7	1,6
ФИП - 2471-285	2130/625	1110/740	40/40/25	7,5/11,5	200	3,5	2,4
ФИП - 3072-315	2290/790	1140/850	50/50/50	12,0/15,5	450	5,5	3,3
ФИП - 3672-315	2365/950	1140/850	50/50/50	17,0/21,0	650	8,0	4,8

Блоки управления: 560 – Fleck 5600, 275 – Fleck 2750, 285 – Fleck 2850, 315 – Fleck 3150.

Параметры приведены для номинальной скорости фильтрации 20–25 м/ч, максимальной – 40 м/ч, потери напора 0,3–0,4 атм.

Продолжительность взрыхления 10 мин, подачи соли и медленной отмычки – 80–100, быстрой отмычки – 15 мин. Расход соли – 120 г на 1 л катионита. Емкость катионита 1000–1100 мг-экв/л.

#### Противоточные фильтры

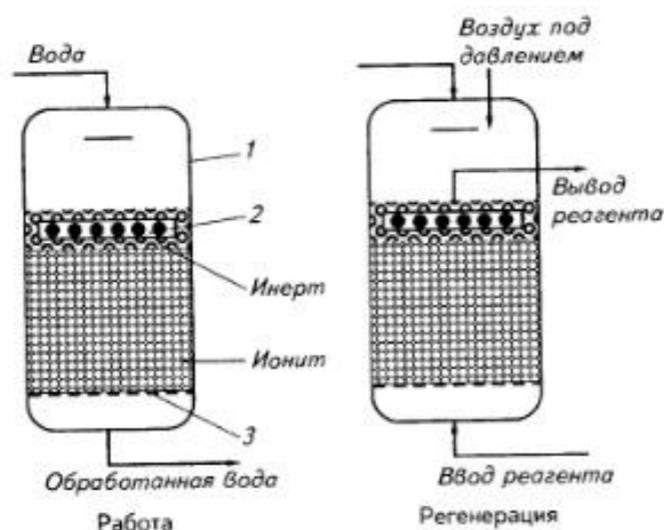
Противоточные фильтры [1, 3, 6, 8, 47–49, 198–208, 211, 212, 220, 221, 231, 233] несколько сложнее прямоточных, но они обеспечивают лучшую эффективность очистки и меньшие расход реагентов и объем регенерата. Основной задачей при создании таких фильтров является необходимость обеспечения сплошного слоя и отсутствия его перемешивания при сорбции и регенерации. Это достигается различными методами, которые, как правило, усложняют конструкцию и эксплуатацию оборудования. Поэтому из десятков предлагаемых конструкций в настоящее время крупное промышленное применение нашли только 3 самых отработанных и надежных варианта [198–201, 203, 206–208, 211, 212, 233]:

1. Фильтры с очисткой воды сверху вниз, а регенерацией снизу вверх и блокировкой слоя ионита от расширения подачей сверху воды или воздуха. Разработаны фирмой «Steinmulfer GmbH».

2. Фильтры с очисткой воды снизу вверх, а регенерацией сверху вниз. Разработаны фирмой «Bayer AG». В настоящее время продвигаются на рынок фирмами «Rohm & Haas» и «Purolite».

3. Фильтры с очисткой воды сверху вниз, а регенерацией снизу вверх. Разработаны фирмой «Dow Chemical Company».

1. Фильтры с очисткой воды сверху вниз, а регенерацией снизу вверх и блокировкой слоя ионита от расширения подачей сверху воды или воздуха были разработаны фирмой «Steinmuller GmbH» в 60-х годах. Это единственный тип противоточного фильтра, освоенный отечественной промышленностью и серийно выпускающийся Таганрогским заводом «Красный котельщик». Такой фильтр состоит (рис. 2.43) из корпуса, верхнего распределительного, среднего сборно-распределительного и нижнего дренажного устройств. Внутри корпуса находится слой ионита. Он должен превышать по высоте на 0,15–0,20 м высоту среднего сборно-распределительного устройства фильтра. Для улучшения качества очистки в зарубежных фильтрах верхняя часть слоя под и над средним дренажем обычно выполнена из инертного материала. Его частицы имеют больший диаметр, чем у ионита, что улучшает условия работы средней дренажной системы.



**Рис. 2.43.** Противоточный фильтр со средним дренажным устройством: 1 – корпус; 2 – среднее дренажное устройство; 3 – нижнее дренажное устройство

При очистке воды она подается так же, как и в прямоточном фильтре, – сверху вниз, распределяется по сечению фильтра верхним распределителем, проходит через слой ионита и через нижнее дренажное устройство выводится из аппарата.

При регенерации, для предотвращения псевдооживления и перемешивания слоев ионита, сверху, противотоком к регенерирующему рас-

твору, подают воздух или блокирующую воду, или регенерат с таким расходом, чтобы предотвратить расширение рабочего слоя. Для подачи регенерата устанавливают дополнительный насос. Поскольку толщина слоя над средним дренажем много меньше толщины рабочего слоя, для создания достаточного усилия, прижимающего слой вниз, расход блокирующей жидкости должен превышать расход регенерирующего раствора в несколько раз. Это крайне неэкономично. Блокировка воздухом предпочтительна, однако необходимо учитывать, что в этом случае все усилия от слоя воспринимаются средним дренажем. Его прочность должна быть высокой.

Фирмой «Bayer AG» в 60-х гг. разработан и запатентован близкий к описанному выше противоточный фильтр под названием «Ринсбед», он отличается наличием специальной решетки, расположенной над средним дренажем и разгружающей его от механических усилий.

Такие фильтры обеспечивают сокращение до 1,5 раз объема регенератов и расхода реагентов, особенно при фракционировании регенерата. В них обеспечивается возможность отмывки слоя ионита от задержанных взвешенных частиц и измельченных ионитов обычным взрыхлением, что обеспечивает возможность переработки мутных растворов.

Работа фильтра состоит из следующих операций:

- очистка воды;
- взрыхление;
- регенерация ионита;
- отмывка.

2. Фильтры с очисткой воды снизу вверх, а регенерацией сверху вниз. Фирмой «Bayer AG» в 60-х гг. разработан и запатентован ряд противоточных фильтров под названиями «Швебебед» и «Лифтбед». Метод регенерации «Швебебед» после окончания действия патента был доработан фирмами «Rohm & Haas» и «Purolite» и предлагается ими в настоящее время под названиями «Амберпак» и «Пьюропак» [198, 200, 203, 206–208, 211, 212, 233].

Такой фильтр состоит из корпуса (рис. 2.44), верхнего и нижнего дренажных устройств. Внутри корпуса находится слой ионита и специального плавающего инертного материала. Высота слоя ионита составляет около 0,9 от высоты рабочей зоны. Толщина слоя инерта должна обеспечивать полное закрытие верхнего дренажа.

Очистку воды производят при ее подаче снизу вверх (рис. 2.44, а). При этом слой ионита поднимается вверх и вместе со слоем инерта прижимается к верхнему дренажу. В нижней части фильтра образуется слой псевдооживленного ионита, который является дополнительным распределителем для воды по сечению фильтра. Этот слой работает с раствором максимальной концентрации и полностью насыщается.

В литературе иногда такие фильтры называют фильтрами с псевдооживленным слоем, но это не совсем корректно.

Для стабильной эффективной работы необходимо обеспечить равномерное распределение раствора по сечению фильтра и предотвратить перемешивание загрузки при работе и при остановках. Поэтому скорость раствора может колебаться от 10–20 до максимальной – 40–50 м/ч. При меньшей скорости слой может оседать и перемешиваться. При эксплуатации этих фильтров нежелательны перерывы в подаче раствора.

Регенерация такого фильтра (рис. 2.44, б) отличается от прямоточной отсутствием операции взрыхляющей отмывки от взвесей.

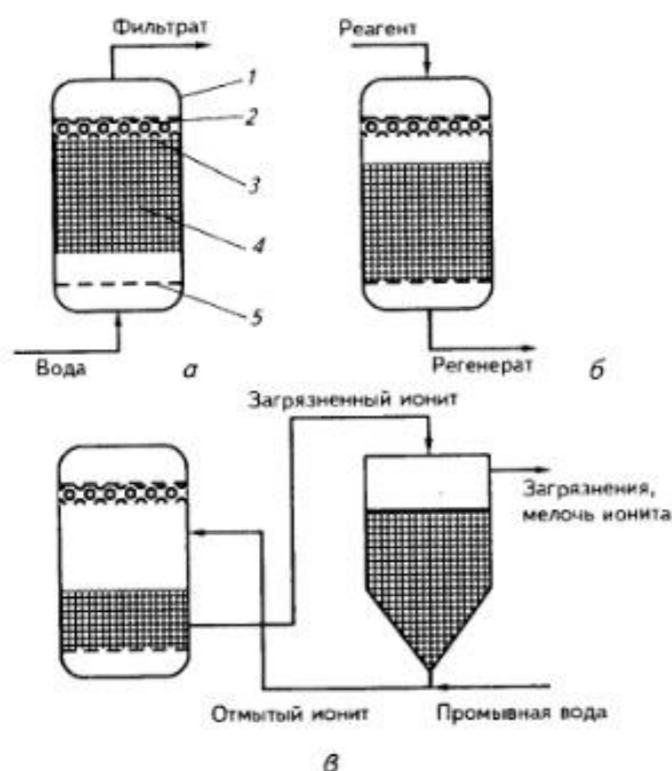


Рис. 2.44. Принцип работы системы Амберпак и Пьюропак:

а – очистка; б – регенерация; в – отмывка ионита от взвесей и измельченных частиц;

1 – корпус; 2 – верхний дренаж; 3 – слой инерта; 4 – ионит; 5 – нижний дренаж

При загрязнении слоя взвесями, обычно нижнего слоя, этот слой выводится из аппарата в специальную безнапорную колонну (рис. 2.44, в), где и отмывается. После отмывки он возвращается в аппарат. Одна промывная колонна может быть транспортабельной и обслуживать несколько фильтров.

Наряду с большей эффективностью регенерации ионитов в противотоке преимуществом такой конструкции является существенно большее количество ионита в одном корпусе, что позволяет либо увеличить

продолжительность фильтроцикла, либо применять фильтры меньших габаритов.

3. Фильтры с очисткой воды сверху вниз, а регенерацией снизу вверх разработаны фирмой «Dow Chemical Company». От английского названия процесса – UP-flow COuntercurrent REgeneration – образована аббревиатура UPCORE (АПКОРЕ) [199, 211, 212]. В нем сочетаются удобство фильтрации сверху вниз, большая загрузка корпуса аппарата ионитом с противоточной регенерацией. Аналогичный процесс предлагает фирма «Rohm & Haas» под названием «Обращенный Амберпак» [200, 233]. От АПКОРЕ он отличается наличием системы выгрузки и внешней отмывки ионита, аналогичной Амберпак.

Конструктивно (рис. 2.45) фильтр близок к предыдущему, однако режимы работы различаются принципиально.

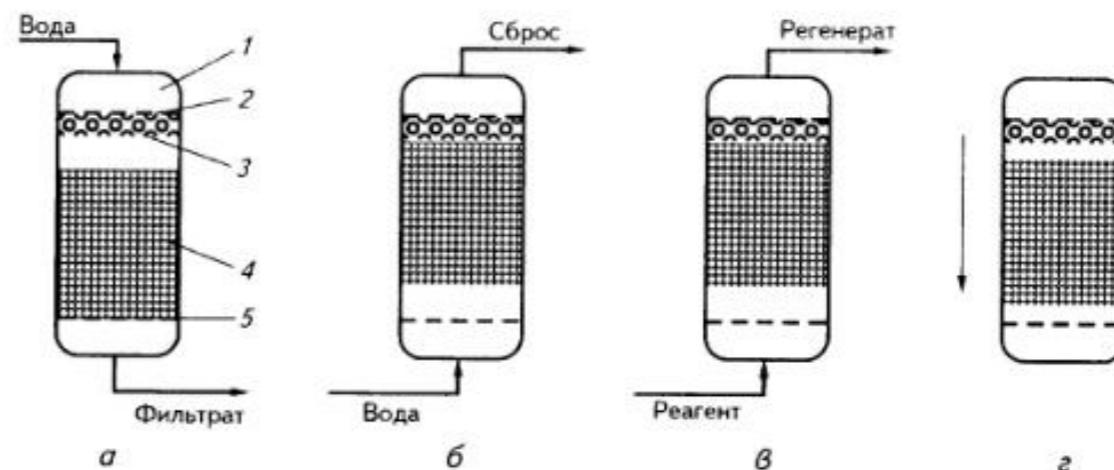


Рис. 2.45. Принцип работы системы АПКОРЕ:

а – режим сорбции; б – подъем слоя и его отмывка от взвесей; в – регенерация; г – осаждение;

1 – корпус; 2 – верхний дренаж; 3 – слой инерта; 4 – ионит; 5 – нижний дренаж

Очистка воды производится сверху вниз (рис. 2.45, а) и не вызывает трудностей. При наличии в воде взвесей они задерживаются в верхнем слое сорбента.

Первой стадией регенерации является подъем слоя ионита (рис. 2.45, б). Для этого в течение 3–5 минут снизу со скоростью 40–50 м/ч подается очищенная вода. Слой ионита поршнем, без перемешивания, поднимается вверх, вместе с инертном прижимается к верхнему дренажу и уплотняется. При этом из верхнего слоя удаляются задержанные ранее загрязнения и мелкие частицы смолы. Затем скорость уменьшается до 5–10 м/ч и начинается последовательно подача регенерирующего раствора и промывочной воды (рис. 2.45, в). По окончании промывки пода-

ча растворов прекращается, и слою дают свободно осесть (рис. 2.45, з). При этом происходит его послойное движение вниз, при котором измельченные фракции оказываются в верхней части слоя и при следующей регенерации удаляются из него.

Проведенные длительные сравнительные технологические испытания 3 типов противоточных установок производительностью по 80 м<sup>3</sup>/ч в процессах обессоливания питающей воды для ТЭС показали, что все они имеют близкие технологические показатели (табл. 2.24) [211, 212].

#### 2.24. Сравнение основных характеристик противоточных установок

Параметр		«Ринсбед»	«Швебебед»	«АПКОРЕ»
Исходный раствор	Солесодержание, мг/л	220		
	SiO <sub>2</sub> , мг/л	4,8	1,8	4,8
Очищенный раствор	Электропроводность, мкСм/см	1–2	1–2	1–2
	SiO <sub>2</sub> , мкг/л	20–50	20–50	20–50
Расход HCl, в % от стехиометрического		140	130	130
Расход NaOH, в % от стехиометрического		150	125	125
Время регенерации, час		6,5	2,7	2,4
Объем промывных вод, л		1950	819	819

Видно, что у фильтров типа «Швебебед» и «АПКОРЕ», полностью заполненных сорбентом, показатели регенерации лучше, чем у «Ринсбед». Кроме того, продолжительность фильтроцикла у них почти вдвое больше.

Автором данной работы было проведено сравнение прямоточных фильтров с аппаратами «Швебебед» и «АПКОРЕ» в режиме умягчения и показано, что качество получаемой воды, емкость ионита и объем отходов при одинаковом расходе соли на регенерацию в противотоке очень близки и лучше, чем у прямоточных.

Выбор способа регенерации может определяться режимом работы установки. При стабильной непрерывной работе оправдано использование «Швебебед», он же «Амберпак» и «Пьюропак». При частых остановках подачи раствора и при наличии в питающей воде взвесей предпочтительнее «АПКОРЕ». Его основной недостаток заключается в необходимости иметь дополнительный насос большой производительности для поднятия слоя в первой стадии регенерации и емкость с соответствующим запасом очищенной воды.

Оценочное сравнение разных типов фильтров приведено на рисунке 2.46.

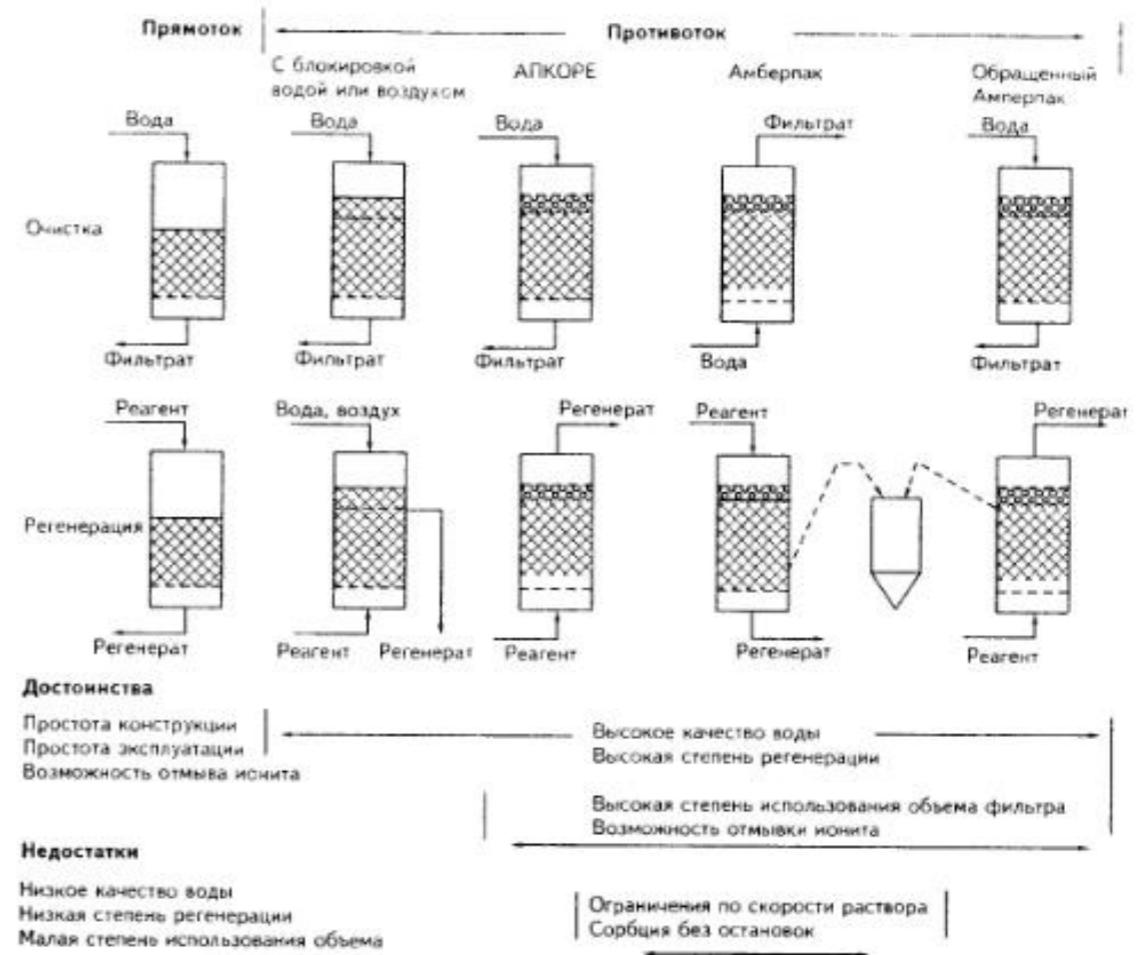


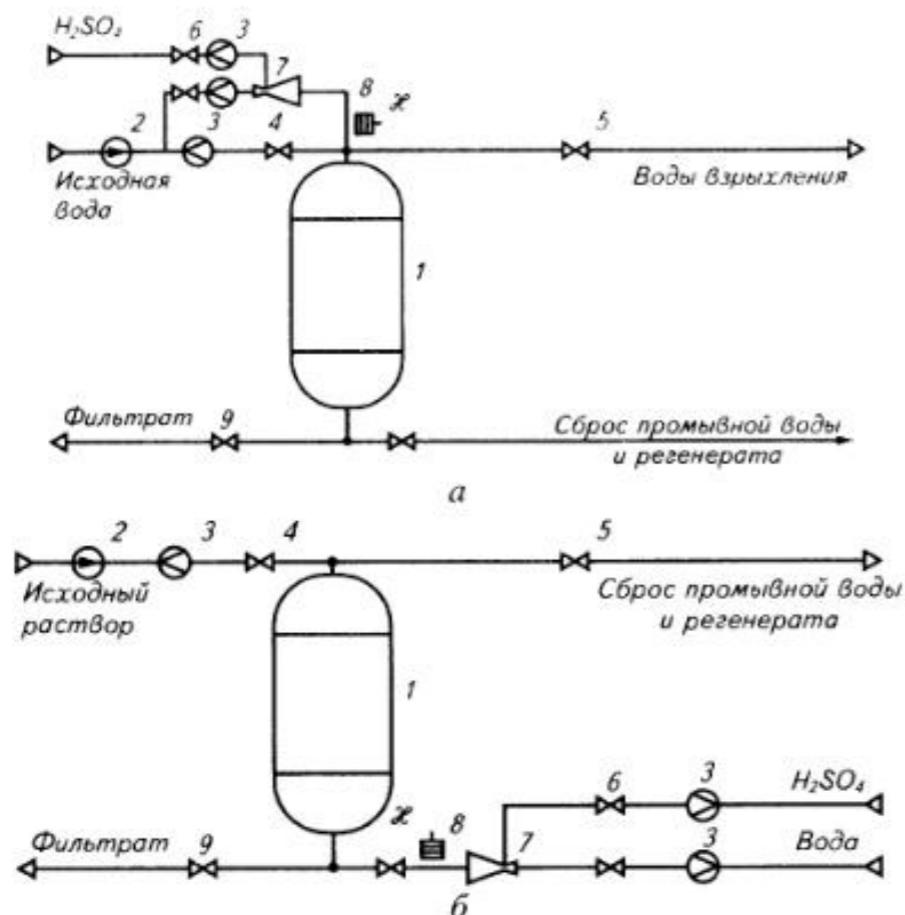
Рис. 2.46. Оценочное сравнение разных типов фильтров

#### Установки с фильтрами периодического действия

Установки периодического действия состоят из собственно ионообменного фильтра и насосов, емкостей, запорной арматуры, системы КИП, обеспечивающих его работу. Каждая крупная установка состоит из идентичных по схеме модулей или узлов, т. е. собственно фильтра с запорной арматурой. Из таких узлов собираются установки по разным технологическим схемам, обеспечивающим заданное качество воды (см. ниже). При наличии нескольких параллельно работающих фильтров установка может непрерывно подавать очищенную воду.

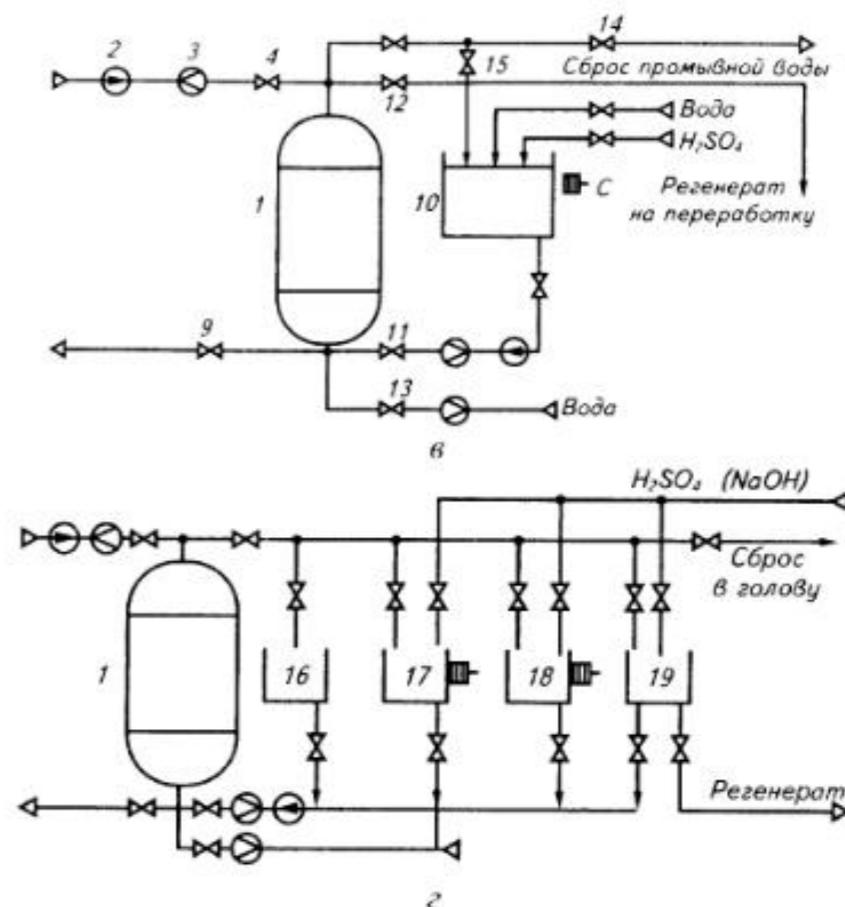
Простейшая установка из единичного прямоточного фильтра показана на рисунке 2.47, а. Она состоит из фильтра 1, системы обвязки, измерения расходов исходной, промывной вод и регенерационного раствора, а также устройства или емкости для приготовления регенерационного раствора.

Очистка воды производится путем ее подачи насосом 2 через открытые клапаны 4 и 9. Расход контролируется расходомером 3.



**Рис. 2.47.** Схемы ионообменных установок периодического действия *а, б* – с регенерацией в потоке; *в* – с оборотом части регенерата; *г* – с фракционированием регенерата

Регенерация может осуществляться различными способами. На рисунке 2.47 показаны варианты организации прямоточной (*а*) и противоточной (*б–г*) регенерации с подачей раствора снизу вверх. Способы организации неподвижности слоя ионита описаны выше. При проточной регенерации (рис. 2.47, *а*) раствор готовится непрерывно при подаче в эжектор 7 воды и концентрированного реагента (соли, кислоты или щелочи). Концентрация регенерирующего раствора определяется по соотношению потоков воды и реагента, измеренному расходомерами 3, и может контролироваться дополнительным концентратомером 8. Подачу реагентов прекращают, закрыв клапан 6 после пропускания заданного объема регенерирующего раствора, продолжая подачу воды, которой производится его отмывка от регенерирующего агента.



с прямоточным (*а*) и противоточными (*б–г*) фильтрами:

1 – фильтр; 2 – насосы; 3 – расходомеры; 4–6, 9, 11–15 – запорные клапана; 7 – эжектор; 8 – концентратомер; 10, 18, 19 – емкости для регенерата; 16, 17 – емкости для промывных вод

Такой способ используется только в случаях, когда объем отходов не лимитирован и они после нейтрализации просто сбрасываются, в частности на большинстве установок водоподготовки АЭС и ТЭС, на которых регенерация проводится  $H_2SO_4$  и  $NaOH$ , а получаемый раствор  $Na_2SO_4$  с примесями солей жесткости сбрасывается в общий коллектор, где разбавляется до санитарных норм. В настоящее время в связи с введением природоохранных мероприятий этот способ не может считаться перспективным.

Сокращение расхода регенерирующего агента и объема регенерата достигается в схеме с промежуточной емкостью (рис. 2.47, *в*). В этом случае регенерирующий раствор приготавливается в специальной емкости 10, из которой он подается насосом через расходомер в фильтр 1 при открытых запорных клапанах 11 и 12.

Полученный регенерат направляется на переработку. После пропускания заданного объема регенерационного раствора, равного емко-

сти бака 10, клапаны 11 и 12 закрываются, и через клапан 13 подается промывная вода. Ее первая, наиболее концентрированная порция через вентиль 15 собирается в емкость 10. Остальные малоконцентрированные порции промывной воды сбрасываются либо возвращаются в голову процесса. Регенерационный раствор готовится путем добавления к первой порции промывной воды концентрированного реагента. В результате часть реагента находится в обороте, что снижает его расход и объем отходов 1,2-1,5 раза.

Наименьший объем отходов и расход реагентов обеспечивает схема с фракционированием регенерата (рис. 2.47, с), которая представляет развитие предыдущей схемы.

В данной схеме регенерат разделяется на отдельные фракции, собираемые в емкости 18 и 19, в данном случае - на две фракции. Первая, наиболее концентрированная, затем отправляется на переработку. Аналогично в две емкости 16 и 17 собирается промывная вода. При необходимости более глубокой отмывки смолы остальные малосолевые промывные воды возвращаются в голову процесса.

При следующей регенерации в качестве первой фракции регенерационного раствора используется вторая фракция от предыдущей регенерации из емкости 18, доукрепленная до заданной концентрации реагентом, которая затем собирается в емкости 19. Второй частью регенерационного раствора становится первая фракция промывной воды из емкости 17, также доукрепленная реагентом. В качестве первой порции промывной воды используется вторая фракция промывной воды из емкости 16, собираемая затем в емкость 17. Последующая отмывка проводится обессоленной или технической водой из сети.

Вероятно, оптимальным, исходя из сложности обслуживания и сокращения расходов реагентов, является разделение регенератов и промвод на две фракции, хотя известны варианты и со значительно большим числом фракций. Такая схема, используемая, например, на Московской станции переработки жидких радиоактивных отходов более 40 лет, позволяет сократить общий объем кислого и щелочного регенератов до 1,5-2%, что особенно важно в случае, когда они подвергаются дальнейшей переработке и захоронению.

Для организации непрерывного получения очищенной воды в описанных схемах устанавливаются параллельно несколько фильтров, минимально - два фильтра, в одном из которых раствор очищается, а второй в это время регенерируется.

Еще более концентрированные регенераты можно получить при обеспечении максимального насыщения ионита в фильтре. Это достигается в схемах с «плавающим» фильтром. В такой схеме очищаемый раствор последовательно пропускается через два-три фильтра. При начале

проскока в последнем фильтре в конец цепочки подключается свежерегенерированный фильтр. А первый по ходу раствора фильтр выводится на регенерацию. При этом весь слой ионита в нем полностью насыщен, в отличие от одиночного прямого и даже противоточного фильтра, в которых значительная часть ионита остается ненасыщенной.

Это позволяет получить большую концентрацию ценного компонента в регенерате. Регенерацию отработанного фильтра можно проводить по описанным выше вариантам.

### Современные бытовые и промышленные ионообменные установки

Все бытовые ионообменные установки выполнены с прямотоком фаз. Они имеют корпуса из пластика или нержавеющей стали и снабжаются блоками управления с многоходовыми клапанами-распределителями. Насыщенный раствор соли готовится в дополнительной емкости-соле-растворителе, устанавливаемой рядом с фильтром. В фильтрах диаметром до 1 м блок управления и многоходовой клапан с электроприводом расположены в едином корпусе, устанавливаемом непосредственно на корпус фильтра (рис. 2.48) либо рядом с ним. Для больших аппаратов используется блок управления с пневматическим или гидравлическим выходом и многоходовой клапан, устанавливаемый рядом с корпусом фильтра (рис. 2.49).

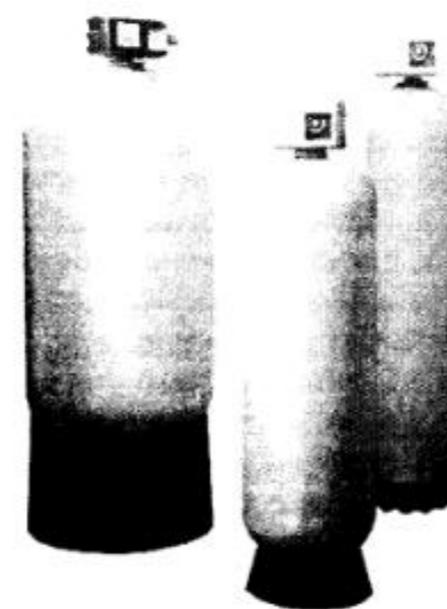


Рис. 2.48. Моноблочные ионообменные фильтры с блоком управления на корпусе

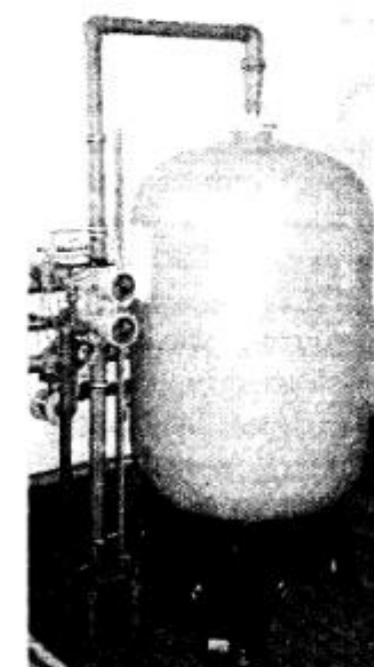


Рис. 2.49. Крупногабаритная ионообменная установка с многоходовым клапаном, установленным рядом с корпусом

Блок управления содержит счетчик воды либо таймер, который дает сигнал к началу регенерации, программно-временное устройство, задающее последовательность и продолжительность проведения операций, а также силовой электропривод,двигающий клапан-распределитель. Бесспорно, что для ионного обмена оптимально включение режима регенерации по объему пропущенной воды. Блоки с таймером, как более дешевые, могут применяться только для бытовых целей.

Работа установки состоит из следующих операций:

- очистка воды (сервисный режим);
- взрыхление;
- засос соли из солерастворителя – регенерация ионита;
- медленная отмывка от регенерационного раствора;
- быстрая отмывка в сервисном режиме;
- заполнение солерастворителя умягченной водой.

Распределительные устройства (дренажи) аналогичны используемым в механических фильтрах.

#### Установки непрерывного действия

Установки непрерывного действия [203, 206, 207, 213–216] характеризуются тем, что все процессы (очистка, взрыхление, регенерация, отмывка) проводятся одновременно, каждый в своем аппарате. Ионит непрерывно или порциями перемещается из аппарата в аппарат. Тип и размеры каждого аппарата оптимизированы для проводимого в них процесса.

Аппараты непрерывного действия бывают со сплошным и псевдооживленным слоем сорбента. В СССР в урановом и золотоизвлекающем производствах с середины 50-х гг. широко применялись установки непрерывного ионного обмена, использующие каскады аппаратов смешения. В 70-е гг. они стали заменяться противоточными колоннами со сплошным (КНСР, КДС, ПСК-НР и т. п.) и псевдооживленным слоем ионита (ПСК, ПСК-Т). В аппаратах со сплошным слоем раствор и сорбент подается в реакционную зону и выводится поочередно, порциями. Частота перемещения сорбента зависит от содержания компонента в растворе. Для малоконцентрированных растворов соотношение расходов раствора и ионита может составлять десятки и сотни раз. Колонны с псевдооживленным слоем используют специальные распределительные тарелки КРИМЗ и низкочастотную, около 1 Гц, пульсацию, т. е. вертикальные колебания раствора. Тарелки и пульсация обеспечивают высокую интенсивность массообмена и равномерное распределение фаз по сечению даже очень крупных аппаратов. Такие колонны применяются для регенерации и отмывки смол от регенерирующего раствора. Колонны с так называемой транспортной пульсацией наиболее эффективны для процессов переработки малоконцентрированных растворов, в том числе при наличии механических взвесей.

Для очистки радиоактивных отходов (по солесодержанию аналогичны природной воде) методом обессоливания разработаны установки со смешанным слоем ионитов, которые позволяли при удельной производительности 40–50 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч в одном аппарате обессоливать воду до удельной электропроводности около 1 мкСм/см [215].

В промышленности эксплуатировались установки единичной производительностью до 300 м<sup>3</sup>/ч с колоннами диаметром до 3,4 м.

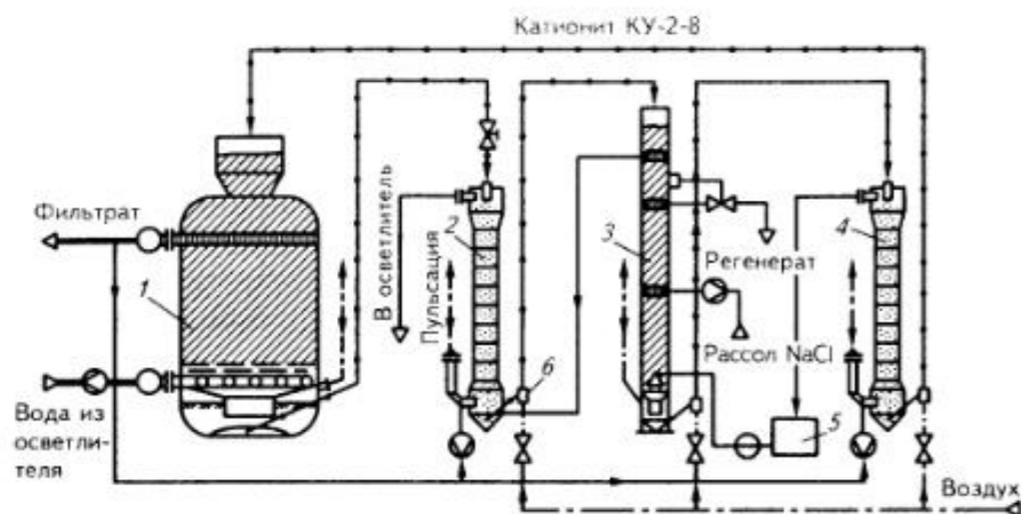
Для очистки воды используются аппараты со сплошным слоем ионитов, для отмывки ионитов от взвеси и регенератов – с псевдооживленным. Регенерация может осуществляться и в сплошном, и в псевдооживленном слое. Все аппараты работают непрерывно с противоточным движением фаз.

Высокая эффективность противоточных колонн позволяет обходиться без паразитных потоков промывных вод. Все воды от отмывки смолы от регенерационного агента доукрепляются им и подаются в колонны регенерации.

Установки такого типа имеют существенно более высокие показатели, чем периодического действия: удельная производительность (скорость раствора) может достигать 50–70 м<sup>3</sup>/ч, единовременная загрузка ионитов сокращается в 5–15 раз, а объем регенератов в 1,5–2,5 раза. Они сложнее периодических, требуют использования автоматики и управляемых вентилях. Их целесообразно использовать при производительности более 30–50 м<sup>3</sup>/ч в экологически чистых технологиях, когда регенераты подвергаются дальнейшей переработке.

В качестве примера на рис. 2.50 показана схема установки производительностью 300–500 м<sup>3</sup>/ч для подготовки подпиточной воды умягчением вод, содержащих значительное количество взвесей. Она была создана на ТЭЦ Лисичанского НПЗ (Украина) в 90–91 гг., но в силу известных причин не была пущена в эксплуатацию. Установка состоит из сорбционной колонны 1 диаметром 3,4 м со сплошным слоем сорбента, колонны 2 для отмывки сорбента от извлеченных из исходного раствора взвесей, диаметром 0,6 м с псевдооживленным слоем сорбента, регенерационно-промывной колонны 3 диаметром 0,6 м со сплошным слоем, и колонны 4 диаметром 0,6 м с псевдооживленным слоем для окончательной отмывки от соли.

Вода подается снизу сорбционной колонны 1, проходит через слой катионита и умягчается. Катионит насыщается в сорбционной колонне и порциями по 0,5 м<sup>3</sup> выводится из сорбционной колонны в промывную 2. В ней он свободно опускается в потоке поднимающейся промывной воды, а затем перемещается в колонну регенерации 3. В регенерационной колонне катионит постепенно опускается, двигаясь навстречу поднимающемуся сначала регенерационному раствору, а затем промывной воде, которая вводится снизу колонны.



**Рис. 2.50.** Схема установки непрерывного ионного обмена для умягчения подпиточной воды производительностью 300–500 м<sup>3</sup>/ч:

1 – сорбционная колонна ПСК-Н-3400; 2, 4 – промывные колонны ПСК-600; 3 – регенерационно-промывная колонна ПСК-РП-600; 5 – промежуточная емкость; 6 – эрлифты

Установка занимала площадь около 36 м<sup>2</sup>, в нее загружалось 20 м<sup>3</sup> катионита КУ-2-8. Объем отходов составлял 0,2% от расхода очищаемой воды.

### Современное состояние ионообменной технологии

В России и Украине в настоящее время наряду с наиболее распространенными отечественными ионитами типа КУ-2-8, КУ-2-8с, КУ-23, АВ-17, АВ-17с мелкими партиями выпускаются слабокислотные катиониты КБ-4 и слабоосновные аниониты АН-31. По несколько большим ценам возможно приобретение импортных аналогов этих ионитов многих ведущих фирм: «Purolite», «Rohm and Haas», «Dow Chemical», «Bayer» и др. Так, полный аналог отечественного КУ-2-8 фирма «Purolite» производит под шифром С-100, «Rohm and Haas» – как SL-1L, IR 120, «Dow Chemical» – как HCR-S, а «Bayer» – как S-100, (табл. 2.19). Аниониты типа АВ-17 производятся фирмой «Purolite» как А-400, «Rohm and Haas» – как IRA 402, «Dow Chemical» – SBR-P, «Bayer» – М 511. Эти иониты выпускаются в модификациях для использования в пищевой (С-100Е), фармацевтической (С-100NaMR), атомной (NRW 100) промышленности.

Кроме того, они предлагают огромный выбор самых разных ионитов со специфическими свойствами. Это, например, традиционные иониты – химические аналоги КУ-2 и АВ-17, но с монодисперсными частицами, имеющими размеры 0,5±0,05 мм, серия Marathon, Monosphere,

UPCORE Mono фирмы «Dow Chemical», Purolite фирмы «Purolite», Amberjet фирмы «Rohm and Haas». Такие иониты обладают значительно большей механической и осмотической устойчивостью и несколько (на 10–15%) большей обменной емкостью, чем традиционные. «Кинетика» таких ионитов, т. е. скорость обмена ионов на них, существенно лучше. Они имеют и меньшее гидравлическое сопротивление. Поэтому они допускают работу при больших скоростях раствора. Наиболее эффективно их применение для противоточных систем и фильтров смешанного действия.

Слабокислотные катиониты, практически не используемые в отечественной энергетике, позволяют удалять щелочность и жесткость при практически нейтральных сбросных регенератах. Это «Purolite» С-104, 106, 107, «Rohm and Haas» – IRS 50, 76, 84, 86, «Dow Chemical» – MAC-3, «Bayer» – CNP 80. При этом они имеют примерно вчетверо большую емкость, чем КУ-2 в режиме голодной регенерации.

Слабоосновные аниониты представлены как современными высокопрочными и стабильными аналогами АН-31, но полимеризационного типа на стирольной и акриловой основе, так и многочисленными представителями новых типов анионитов: органопоглотителей, комплексообразующих, т. е. селективных к определенным ионам, высокопористых и т. п. Количество вариантов таких анионитов составляет несколько десятков.

К сожалению, состояние отечественных заводов-производителей ионитов и их головного разработчика ВНИИПМ, а также ГП ВНИИХТ – разработчика ионитов для атомной промышленности – не позволяет надеяться на то, что в обозримом будущем их ассортимент будет расширен.

Достаточно распространены за рубежом и начинают внедряться на отечественных предприятиях (ТЭЦ 12, ГЭС 1 и др.) системы с противоточной регенерацией ионитов. Как давно доказано теорией, а теперь и многолетней практикой, они дают возможность резко повысить качество воды на одной ступени очистки при сокращении расхода реагентов и производственных площадей. Так, противоточная система позволяет на одной ступени умягчения получить воду с жесткостью менее 0,01 мг-экв/л при скорости раствора до 40–50 м/ч и расходе соли не более 120% от стехиометрического.

Наряду с серийными противоточными фильтрами ТКЗ со средним распределительным устройством несколько отечественных фирм предлагают противоточные системы типа АПКОРЕ («Dow Chemical») и Пэкетбед («Amberpak», «Puropak»). Причем предлагается переоборудование корпусов существующих фильтров новыми дренажными устройствами, загрузка в них моносферных ионитов и инертного слоя и обвязка оборудования пластиковыми трубами. В результате такой относительно дешевой модернизации резко возрастает производительность, повышается качество воды при

снижении расхода реагентов. Противоточные фильтры ТКЗ, устаревшие еще до своего внедрения в серию, сложнее в эксплуатации и не обеспечивают ряда преимуществ противоточного процесса.

Моносферные иониты позволяют легко реализовать системы со «стратифицированной» загрузкой, т. е. с послойным расположением «слабого» и «сильного» ионитов в одном аппарате и с противоточной последовательной их регенерацией (раздел 3.5). Правда, сведения о промышленном использовании таких систем в нашей стране пока отсутствуют.

### 2.3.2. Электродиализ

Электродиализом называется процесс удаления из раствора ионов растворенных веществ путем избирательного их переноса через мембраны, селективные к этим ионам, в поле постоянного электрического тока [1, 6, 8, 32, 39, 238–244].

При наложении постоянного электрического поля на раствор ионизированных веществ (электролитов) возникает направленное движение ионов растворенных солей, а также ионов  $H^+$  и  $OH^-$ . Причем катионы движутся к катоду, а анионы – к аноду. Если раствор разделить на секции с помощью специальных мембран, проницаемых только для катионов или только для анионов, то катионы, двигаясь к катоду, будут свободно проходить через катионитовую мембрану. Для анионов же она практически непроницаема. Анионы, пройдя через анионитовую мембрану, будут двигаться к аноду. Таким образом раствор разделится на обессоленную воду, находящуюся между мембранами, и концентрированные рассолы – щелочной католит и кислый анолит (рис. 2.51).

Ионитные мембраны для процесса электродиализа должны обладать высокой селективностью, малой проницаемостью для молекул воды, хорошей электрической проводимостью, высокой механической прочностью и химической стойкостью. Мембраны подразделяются по знаку заряда матрицы на катионитные и анионитные, а по способу получения на гетерогенные и гомогенные.

Гетерогенные мембраны представляют собой тонкодисперсный ионит, распределенный в пленке инертного связующего материала.

Гомогенные мембраны получают в результате реакции поликонденсации или методом привитой полимеризации. Они характеризуются сплошной фазой ионита по всей пленке.

**Конструкции электродиализных аппаратов.** В настоящее время для обессоливания воды используются многокамерные плоскорамные аппараты. Они представляют собой мембранный пакет, зажатый между пластинами, которые являются анодом и катодом соответственно (рис. 2.51). Мембраны разделены прокладками и турбулизирующими вставками (сетками), которые служат для улучшения гидродинамики движения растворов в аппарате. Опресняемая вода поступает в четные камеры и

параллельными потоками движется через них. С другой стороны этих камер выводится опресненная вода – диллюат, диализат. Через нечетные камеры циркулирует рассол извлеченных солей. У анода и катода происходит разрядка анионов и гидроксил-ионов, и катионов и водородных ионов, соответственно, с образованием кислого анолита и щелочного католита.

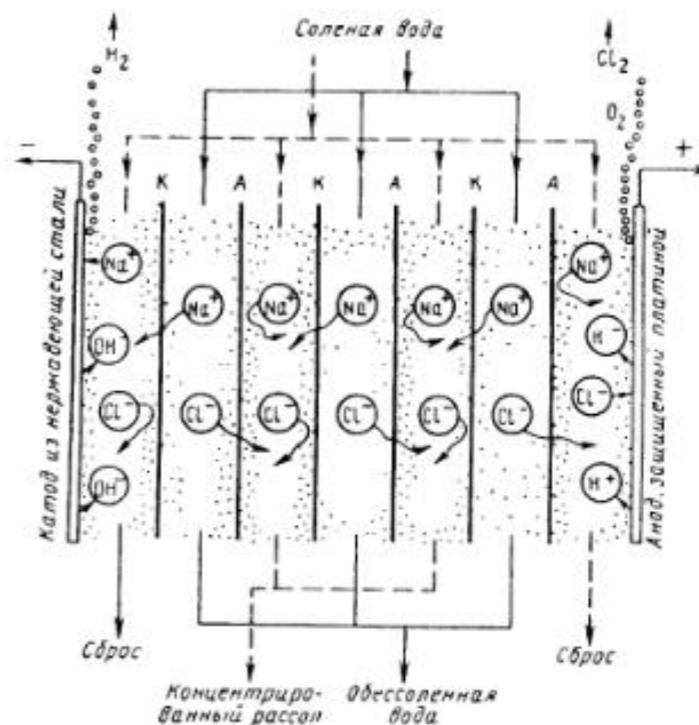


Рис. 2.51. Схема многокамерного электродиализатора

Стягивание мембранного пакета может осуществляться как вручную с помощью стяжных шпилек, так и с помощью гидравлического оборудования. Количество и размер мембран в пакете зависят от требуемой производительности аппарата. В качестве материала электродов используют графит, нержавеющую сталь, платинированный титан и др.

В зависимости от требуемой производительности и глубины обессоливания выбирается режим работы электродиализных аппаратов. В некоторых случаях возможна установка нескольких аппаратов, включенных последовательно и работающих на проток (по диллюату). В основном же применяется схема с циркуляцией диллюата и постоянным отбором обессоленной воды и подводом исходной. При необходимости получения глубокообессоленной воды электродиализный аппарат работает в периодическом режиме. Диллюат циркулирует в аппарате до достижения требуемой глубины обессоливания, а затем полностью выводится из аппарата и заменяется новой порцией исходной воды.

С ростом концентрации солей в рассольном контуре аппарата и снижением концентрации в диллюатном контуре процесс очистки ухудшается. Это связано с ростом сопротивления диллюата, а также с явлением концентрационной поляризации. Последнее вызывается тем, что движение ионов через мембрану идет с большей скоростью, чем в растворе, что приводит к падению концентрации электролита около принимающей стороны мембраны и повышению концентрации около отдающей стороны. Существует такая плотность тока, называемая предельной, при которой концентрация электролита около принимающей стороны мембраны снижается до нуля и начинается перенос  $H^+$  и  $OH^-$ -ионов, образующихся при электролизе воды. Это вызывает перерасход энергии, изменение pH, нагревание раствора. Солеосодержание при этом не изменяется.

Для повышения эффективности работы электродиализного аппарата, снижения количества вторичных отходов (рассола) возможна установка на рассольном контуре электроосмотического аппарата концентрирования. При этом рассольный контур электродиализного аппарата является диллюатным для электроосмотического концентратора, из последнего выводится концентрированный рассол (180–250 г/л). В рассольном контуре электродиализного аппарата поддерживается солеосодержание, оптимальное для заданных условий обессоливания.

Существенное негативное влияние на процесс электродиализа оказывает наличие в воде солей жесткости и железа. Нерастворимые соли кальция откладываются на поверхностях мембран, что ведет к повышению сопротивления и падению производительности. Железо, находящееся в воде в растворенном виде, накапливается в структуре мембран, что приводит к потере мембранами электропроводности. Наличие взвешенных веществ в воде приводит к забиванию ячеек аппарата и падению его производительности. Для борьбы с этими явлениями проводят предварительную обработку воды, включающую удаление взвесей и коллоидов, а также умягчение воды. Для удаления железа проводят промывку аппарата растворами кислот. Все это ведет в конечном итоге к существенному увеличению количества вторичных отходов и делает процесс очистки малоэффективным.

Область применения электродиализа ограничивается солеосодержанием растворов 0,5–10 г/л, так как при меньших концентрациях падает проводимость раствора и уменьшается эффективность использования электроэнергии, а при больших процесс становится экономически невыгоден вследствие существенного роста энергозатрат, так как затраченная электроэнергия пропорциональна количеству удаляемых ионов.

Поэтому ЭДУ наиболее экономичны при получении питьевой воды с солеосодержанием 0,2–0,5 г/л из солоноватой или морской.

Обычный электродиализный аппарат способен обессолить воду до нескольких десятков мг/л и получить концентрат с содержанием солей до 35 г/л.

Для получения большего концентрирования солей используют дополнительные аппараты – концентраторы, например, электроосмотические.

Требования к исходной воде для ЭДУ:

- взвеси менее 2 мг/л;
- цветность до 20°;
- окисляемость до 5 мг  $O_2$ /л;
- содержание железа менее 0,1 мг/л.

С 1960–70 гг. проводились работы по использованию электродиализа для глубокого обессоливания воды. Для этих целей применяют аппараты с засышкой смешанного слоя из сильнокислотного катионита и сильноосновного анионита в пространство между мембранами. Очищаемая вода проходит через слой смеси ионитов и обессоливается. Одновременно под действием электрического тока иониты должны регенерироваться. Важнейшей задачей создателей таких установок было обеспечение равенства скоростей насыщения ионитов и их регенерации. При обессоливании природной воды с солеосодержанием в сотни мг/л этого не удалось достигнуть. В СССР и РФ такие работы не вышли из стадии экспериментов.

Ряд зарубежных фирм в настоящее время предлагает такие аппараты нового поколения – так называемые электродеионизаторы непрерывного действия (EDI), например, серии E-CELL фирмы «Osmonics» [110, 244].

Принципиально новым является выбор области применения – глубокая доочистка предварительно обессоленной воды для нужд микроэлектронной промышленности и медицины. Исходной водой для EDI является обессоленная вода после установок обратного осмоса с солеосодержанием менее 50 мг/л, следовыми количествами взвесей, солей жесткости, железа, марганца и свободного хлора. Основными загрязнителями являются ионы натрия и хлора, имеющие минимальное сродство к ионитам и легко вытесняемые из них. В этих условиях скорость электрохимической регенерации смеси ионитов, находящихся между мембранами, сопоставима со скоростью накопления в ионитах солей. Процесс протекает в равновесных условиях без загрязнения ионитов труднорегенерируемыми компонентами. При конверсии 90–95% очищенная вода имеет сопротивление на уровне 16 МОм/см. Производительность единичного модуля доходит до 3 м<sup>3</sup>/ч.

## 2.4. Сравнение методов очистки воды

В таблице 2.25 дана обобщенная оценка рассмотренных методов водоподготовки с точки зрения их применимости для удаления различных загрязнений, достоинств и недостатков.

### 2.25. Сравнение методов очистки воды

Загрязнение	Способ очистки	Взвеш	Органик	Микроорганизмы	Со.содержание	Жесткость	Железо	Тяжелые металлы	Вид отходов	Объем отходов, %	Достоинства	Недостатки
Фильтрация	механическая	+					(+)		шлам	5	без реагентов	-
	микро-	+		+			+			5-30		
	ультра-	+	+	+			+		концентрат	25-60		
	нано-	+	+	+	(+)	+	+	+				
обратный осмос	+	+	+	+	+	+	+					
Окисление	Cl <sub>2</sub>			+	+		+	+	-	-	последствие	агрессивные реагенты
	O <sub>3</sub>								-	-	-	сложность, энергоемкость
Коагуляция		+	(+)				+	+	шлам	5	-	объем оборудования
Реагентная обработка		+	(+)		(+)	+	+	(+)	-	-	-	реагенты
Адсорбция			+				(+)		уголь	<1	-	-
Ионный обмен	умягчение					+	+	+	регенерат	1-10	надежность	агрессивные реагенты, солевые отходы
	обессоливание		(+)		+	+	+	+				
Электродиализ					+	+	+	+	концентрат	1-5	без реагентов	сложность
Выпарка		+			+	+	+	+	концентрат	5-10		энергоемкость
УФО			(+)	+					-	-	-	-

(+) – частично.

## 3. Способы водоподготовки. Очистка воды для промышленного и бытового использования. Основные понятия и принципиальная схема

Природные воды, как правило, содержат целый набор загрязнений различной природы. Это и механические частицы, и соли тяжелых металлов (железо, марганец и т. п.), и органические молекулы разных размеров (гумагы, ПАВы и т. п.), бактерии и вирусы, а в некоторых случаях и радионуклиды.

Очевидно, что при создании аппаратно-технологической схемы установки водоподготовки основополагающими являются состав исходной воды и требования заказчика к очищенной воде. Возможность выполнения этих требований одним методом очистки крайне редка. Практически всегда необходима комбинация нескольких способов. Оптимальный выбор сочетания таких способов особенно актуален в настоящее время, когда наряду с ужесточением требований к качеству воды на первый план выходит экологическая безопасность всего процесса. Необходимо не только получить чистую воду, но и добиться того, чтобы объем отходов был минимален и они были нетоксичны.

В многочисленных отечественных публикациях последнего времени [19–39, 116–120, 125–133] рассмотрены реализованные схемы водоподготовки для различных производств.

Основными технологическими приемами водоподготовки, которые реализуются различными методами, являются:

1. очистка воды от взвешенных частиц;
2. очистка от железа и марганца;
3. удаление органических загрязнений (обесцвечивание, дезодорация);
4. умягчение воды;
5. обессоливание;
6. удаление биологических загрязнений;
7. коррекция состава воды (щелочности или кислотности, содержания Са, F, I и т. п.).

На рисунке 3.1 показаны в логической последовательности все указанные элементы. Технологические схемы водоподготовки, состав которых определяется качеством используемой воды и заданными параметрами очищенной, создаются путем различного сочетания этих элементов.

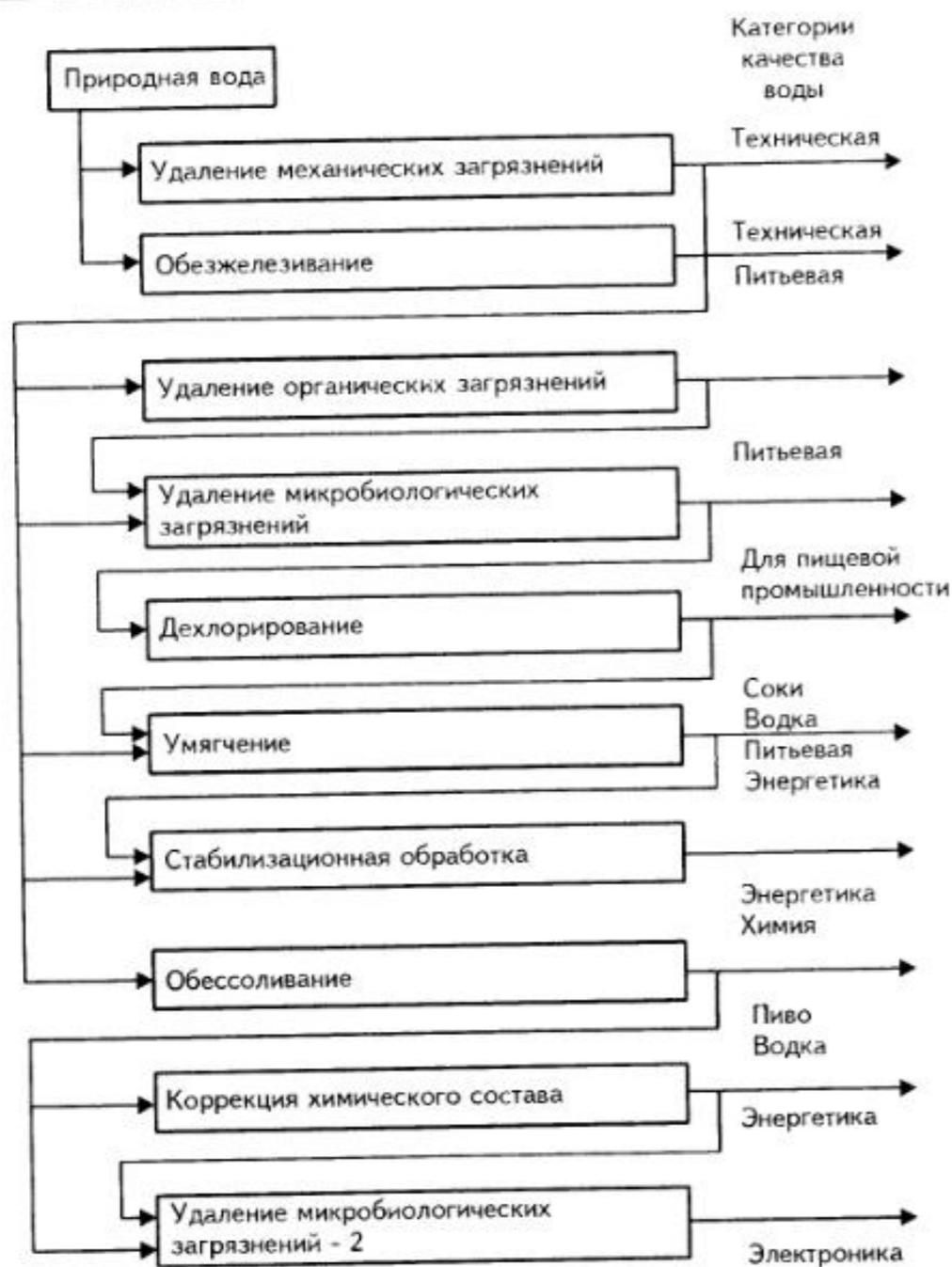


Рис. 3.1. Способы водоподготовки

### 3.1. Методы извлечения и разделения частиц

Как указывалось выше, макрочастицы могут самопроизвольно оседать. Поэтому как один из вариантов их удаления может использоваться метод осаждения. Однако он малопродуктивен и практически не применяется. Ускорение процесса осаждения достигается путем агрегатирования частиц при добавлении специальных реагентов методами флокуляции или коагуляции (раздел 2.2). Достаточно легко такие

частицы отфильтровываются на сетках, гранулированных загрузках, различных пористых перегородках (раздел 2.1.2).

Микрочастицы самопроизвольно не осаждаются. Для осаждения их необходимо укрупнить, что выполняется методами флокуляции или коагуляции. Они также могут извлекаться из раствора микрофильтрацией на различных пористых материалах. При порах меньших, чем размер бактерий, они удаляются, и раствор стерилизуется.

Крупные макромолекулы также могут быть удалены методами флокуляции или коагуляции. Они извлекаются из раствора методами микро- и ультрафильтрации на специальных мембранах с размером пор меньшим, чем у извлекаемых частиц.

Микрочастицы с молекулярной массой до 1000–50000 единиц (дальтон), а также бактерии эффективно извлекаются из раствора ультрафильтрацией (раздел 2.1.3).

Молекулы органических соединений с различной молекулярной массой могут удаляться сорбцией на высокопористых веществах.

Ионы растворенных неорганических веществ могут извлекаться комплексно или селективно реагентным методом, фильтрацией – нанофильтрацией и обратным осмосом (раздел 2.1.3) – или ионным обменом (раздел 2.3).

Органические и биологические загрязнения могут быть разрушены или уничтожены сильными окислителями (раздел 2.2).

Биологические загрязнения инактивируются и уничтожаются также физическими воздействиями, такими как ультразвук, электрические разряды, ультрафиолетовое облучение (раздел 2.1.4).

Рассмотрим более подробно способы очистки воды.

### 3.2. Очистка от взвешенных частиц

Очистка от взвешенных частиц может быть осуществлена методами отстаивания (в бытовых условиях) и фильтрации на насыпных и мембранных фильтрах (раздел 2.1.1, 2.1.2).

Для питьевых целей необходимую степень извлечения частиц с размером более 20 мкм полностью обеспечивают насыпные фильтры с различными загрузками. Мембранные фильтры позволяют удалять более мелкие загрязнения (раздел 2.1.3).

### 3.3. Обезжелезивание

В природной воде, особенно в воде подземных источников, в больших количествах в растворенном виде содержится железо и часто, марганец. Нормы их содержания в питьевой воде составляют по СанПиН 2.1.4.1074-01 0,3 мг/л для железа и 0,1 мг/л для марганца. Требования многих производств значительно жестче.

Удаление железа из воды называют обезжелезиванием. Часто одновременно удаляется и марганец, т. е. проводится деманганация [1–15, 21–25, 32, 40, 67–70, 76–78, 81, 82, 245].

Железо находится в воде в следующих формах:

- двухвалентное – растворенное в виде ионов  $Fe^{2+}$ ;
- трехвалентное (хотя хлориды и сульфаты  $Fe^{3+}$  хорошо растворимы в воде, ионы  $Fe^{3+}$  полностью гидролизуются в нерастворимый гидроксид  $Fe(OH)_3$ , который находится в виде взвеси или осадка);
- органическое железо (находится в виде различных растворимых комплексов с природными органическими кислотами (гуматов), имея, как правило, коллоидную структуру);
- бактериальное железо – продукт жизнедеятельности железобактерий (железо находится в их оболочке).

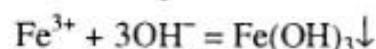
В подземных водах присутствует, в основном, растворенное двухвалентное железо в виде ионов  $Fe^{2+}$ . Трехвалентное железо появляется после контакта такой воды с воздухом и в изношенных системах водораспределения при контакте воды с поверхностью труб.

В поверхностных водах железо уже окислено до трехвалентного состояния и, кроме того, входит в состав органических комплексов и железобактерий.

Подход к очистке таких вод от железа различен.

Если в воде присутствует только трехвалентное железо в виде взвеси, что бывает в системах, питающихся подземной водой через водонапорные башни, достаточно простого отстаивания или механической фильтрации на фильтрах с размером пор менее 5 мкм.

Для извлечения растворенных двухвалентного железа и марганца сначала необходимо их окислить и перевести в нерастворимую форму. Для окисления используют кислород воздуха, хлор, озон, перманганат калия. Частицы окисленных железа и марганца в виде гидроокисей отфильтровываются на гранулированной загрузке. Эта операция обычно сопряжена с механической фильтрацией (рис. 2.2) и может производиться на традиционных песчаной, антрацитовой или гравийной загрузках. Однако их эффективность низка, поскольку процесс окисления и формирования хлопьев достаточно длителен.



Такие материалы начинают эффективно работать только после наращивания на их частицах слоев гидроокиси железа  $Fe(OH)_3$ , работающей как катализатор дальнейшего окисления.

Принципиально новыми продуктами, появившимися в последнее десятилетие, являются специальные каталитические загрузки, позволяющие с высокой эффективностью проводить обезжелезивание и де-

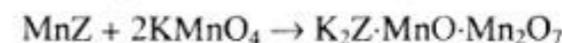
манганацию. К ним относятся Бирм (Birm), пиролюзит, магнетит, Гринсенд (Manganese Greensand, MZ-10) и МТМ и их аналоги с другими названиями, производства конкурирующих фирм. Это природные материалы, содержащие диоксид марганца, например, типа пиролюзита, либо цеолиты, в которые при соответствующей обработке вводится диоксид марганца. При пропускании воды, содержащей двухвалентное железо и поливалентный марганец, через слой таких наполнителей происходит окисление железа и марганца и их перевод в нерастворимую гидроокись, осаждающуюся на загрузке.

Бирм (Birm) представляет собой горную породу, содержащую природный диоксид марганца, эффективно работающий при наличии в воде растворенного кислорода воздуха. В случае, когда содержание железа незначительно (единицы мг в 1 литре), при пропускании воды через каталитическую загрузку типа Birm) содержащегося в воде кислорода оказывается достаточно для окисления железа. Образующаяся гидроокись отфильтровывается на слое загрузки. При большем содержании железа (до 10 мг/л) или недостатке растворенного кислорода (например, в подземных водах) для окисления всего железа в воду необходимо ввести кислород воздуха. Он может быть подан прямо в питающий трубопровод с помощью эжектора или компрессора (рис. 3.2, а) или методом объемной аэрации (рис. 3.2, б). Сам фильтр по устройству и блок автоматического управления аналогичны механическому, но установка обязательно снабжена автоматическим воздухоотделителем. При дополнительном введении воздуха желательнее иметь до фильтра деаэрационную колонну. Объемная аэрация позволяет, кроме того, отдуть из воды присутствующий сероводород и создать буферный запас воды.

Гринсенд (Manganese Greensand, MZ-10) [198] и его химический аналог МТМ представляют собой пористые носители (цеолиты), в структуру которых введен марганец. Greensand (в переводе с английского – зеленый песок) – это минерал глауконит. Manganese Greensand является натриевым глауконитом ( $NaZ$ ), предварительно обработанным раствором хлорида марганца, который необратимо поглощается цеолитом.



При последующем контактировании с раствором перманганата калия на поверхности частиц образуется слой высших окислов марганца:



В такой форме марганцевый цеолит служит источником кислорода, который окисляет ионы двухвалентных железа и марганца до трехвалентных. В окисленном состоянии железо и марганец осаждаются в виде нерастворимых гидроокисей:



Пленка высших окислов марганца расходуется на окисление железа и марганца, и поэтому необходимо ее постоянное или периодическое восстановление. Для этого загрузка либо предварительно обрабатывается раствором перманганата калия, либо его постоянно дозируют в воду с помощью системы пропорционального дозирования (насоса-дозатора) перед ее поступлением в фильтр (рис. 3.2, в). Использование перманганата калия совместно с данными загрузками позволяет также удалить сероводород, окислив его до элементарной серы, и частично органические вещества и биологические загрязнения, обеспечивая обеззараживающие воды.

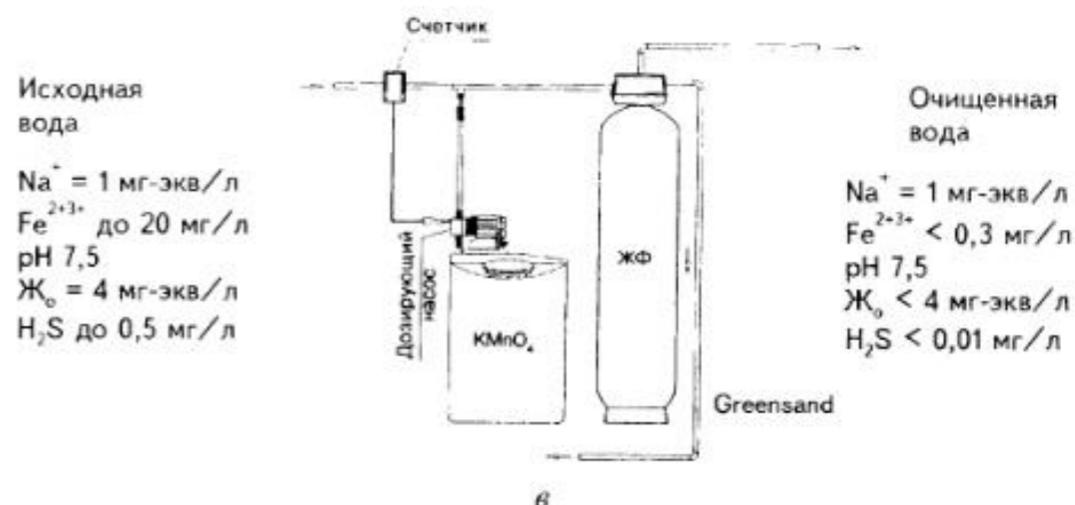
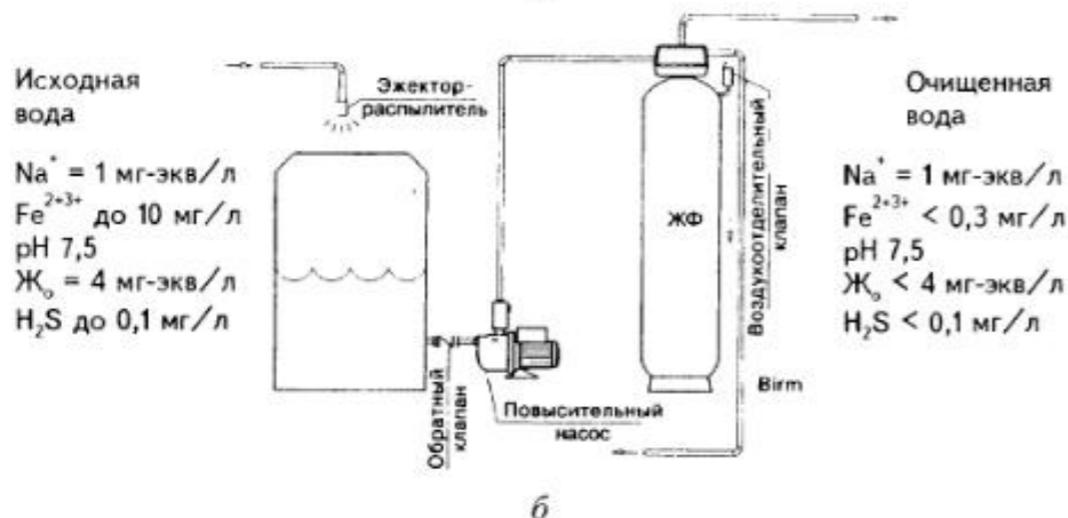
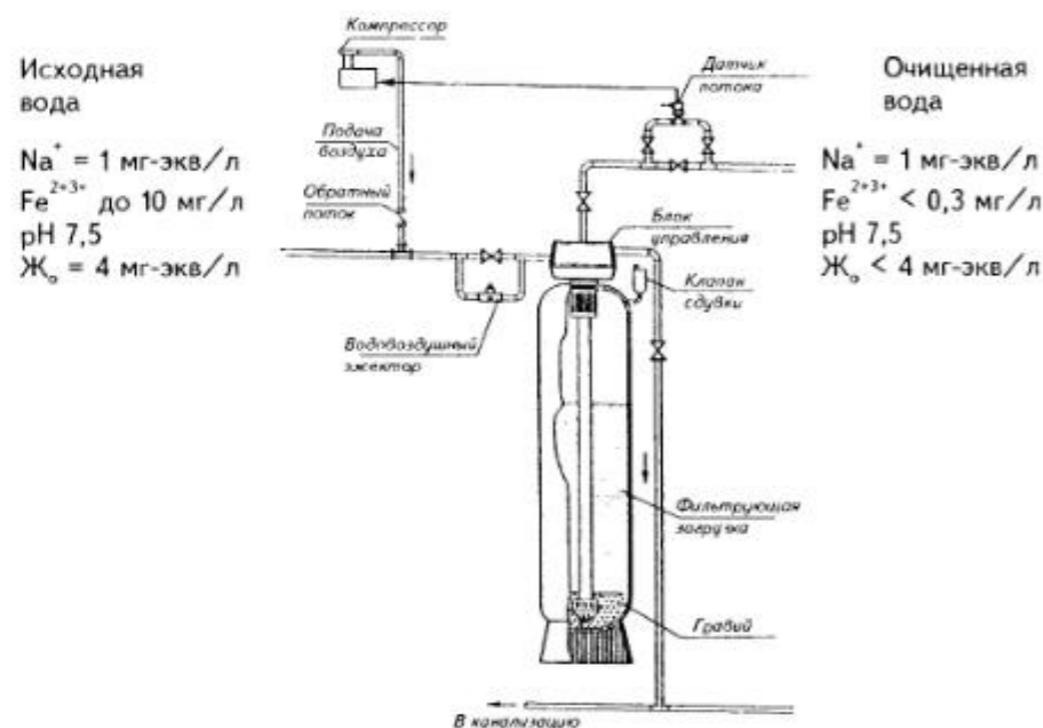


Рис. 3.2. Основные способы обезжелезивания воды:

а – подача воздуха компрессором или эжектором; б – объемная аэрация; в – дозирование перманганата

В первом варианте обработка перманганатом калия производится при каждой регенерации загрузки. Регенерация включает в себя взрыхление загрузки подачей воды снизу, при этом из слоя удаляются задержанные гидроокиси металлов и механические загрязнения. Затем в фильтр сверху подается раствор перманганата калия в расчетном количестве, и после его пропуска загрузка отмывается водой до отсутствия в ней следов марганцовки. Для проведения эффективной регенерации количество перманганата калия берется с большим избытком, который поступает в сточные воды. Если для очистки стоков используются биосептики, как это принято в современных коттеджах, поступивший в них перманганат полностью убивает микроорганизмы и выводит септик из строя.

В этом варианте сам фильтр и устройство автоматического управления аналогичны фильтру умягчения (см. ниже), в солевом баке которого находится раствор перманганата.

Во втором случае регенерация фильтра производится традиционной обратной промывкой, аналогично с механическими фильтрами.

Сравнивая эти два способа, можно отметить, что при непрерывном дозировании перманганат калия используется в стехиометрическом количестве. Однако при изменении состава воды, например, сезонном, возможно либо недоокисление железа и марганца, либо попадание не прореагировавшего избытка перманганата в очищенную воду. Последнее приводит к превышению ПДК по марганцу и появлению на сантехнике трудноудаляемых загрязнений.

Обработка загрузки перманганатом при регенерации, как отмечалось, требует больших затрат дорогостоящего реагента и выводит из строя септики.

Сделанный расчет (см. приложение 8.7) для очистки  $0,8 \text{ м}^3$  в сутки воды, содержащей  $4,0 \text{ мг/л}$  двухвалентного железа и  $0,3 \text{ мг/л}$  марганца, показал, что при периодической регенерации с рекомендованным изготовителем расходом, равным  $2 \text{ г KMnO}_4$  на  $1 \text{ л}$  загрузки, годовое потребление составит  $17,2 \text{ кг KMnO}_4$ . При непрерывном дозировании в количестве, рассчитанном для полного окисления железа и марганца, годовое потребление составит  $1,34 \text{ кг KMnO}_4$  [40]. Следовательно, в первом случае избыточные почти  $16 \text{ кг KMnO}_4$  будут сброшены в канализацию с соответствующим результатом [245].

Гринсенд имеет большую плотность и требует большего расхода воды на взрыхление, чем МТМ, но обеспечивает более тонкую фильтрацию. Применение загрузок типа Greensand, MZ-10, МТМ дает возможность удалять до  $20 \text{ мг/л}$  железа и до  $5 \text{ мг/л}$  марганца.

Наиболее сложно удалить железо, входящее в состав органических соединений и биологических объектов. Необходимо либо разрушить органические комплексы, либо, наоборот, их агрегатировать для создания условий для осаждения, либо извлечь их из раствора.

Органические комплексы гуминовых и фульвокислот очень стойкие и при обработке обычными окислителями трудно и не полностью разрушаются. Хлорирование дает незначительный эффект и приводит к появлению токсичных продуктов. Более эффективно и экологически безопасно для потребителя озонирование. Поскольку разные воды существенно отличаются по составу, эффективность такой обработки может быть установлена только при экспериментах с конкретным образцом воды. В ряде случаев озонирование не дает ощутимого эффекта.

Стандартным методом удаления органических загрязнений является сорбция на активированных углях. Этот способ широко используется в промышленности и муниципальной водоподготовке. Применяется фильтрация через слой гранулированного угля или введение пылевидного угля. Наилучшие результаты получаются при совместном использовании пылевидного угля и коагуляции.

Коагуляция солями железа или алюминия дает, как правило, хорошие результаты по удалению органического железа.

Современными эффективными методами удаления органических загрязнений являются сорбция на специальных слабоосновных анионитах – органопоглотителях (скавенжерах), и ультрафильтрация на мембранах. При обработке воды, содержащей железо, находящееся в очень прочном комплексе с гуматами, который не разрушался хлором и озоном, применение органопоглотителя позволило одним его объемом очистить от железа и органических примесей до  $20000$  объемов воды.

Обработка этой же воды солями алюминия в режиме контактной коагуляции также дала хорошие результаты (раздел 4.2).

Бактериальное железо удаляется как методами коагуляции и ультрафильтрации, так и с использованием железобактерий.

### 3.4. Умягчение воды

Процесс удаления из воды солей жесткости называют умягчением [1, 3–8, 19–32, 110, 111, 121, 124, 198–205, 219, 221, 227–233, 235–237, 246].

Жесткая питьевая вода горьковата на вкус и оказывает отрицательное влияние на органы пищеварения. По нормам ВОЗ оптимальная жесткость питьевой воды составляет  $1,0–2,0 \text{ мг-экв/л}$ . В бытовых условиях избыток солей жесткости приводит к зарастанию нагреваемых поверхностей в бойлерах, чайниках, трубах, отложению солей на сантехнатуре и выводу ее из строя, а также оставляет налет на волосах и коже человека, создавая неприятное ощущение их «жесткости». При стирке, взаимодействуя с ПАВами мыла или стиральных порошков, соли жесткости связывают их и требуют большего расхода.

В пищевой промышленности жесткая вода ухудшает качество продуктов, вызывая выпадение солей при хранении. Это характерно для бутилированной питьевой воды, пива, соков, водки. Даже при мытье бутылок она оставляет несмываемые потеки. Поэтому жесткость воды, используемой для приготовления различных продуктов, четко регламентирована и находится на уровне  $0,1–0,2 \text{ мг-экв/л}$  (табл. 1.6).

В энергетике случайное кратковременное попадание жесткой воды с систему очень быстро выводит из строя теплообменное оборудование, трубопроводы. Даже небольшой слой отложений солей на поверхности теплообменного оборудования приводит к резкому снижению коэффициента теплопередачи и увеличению расхода топлива. Трубопроводы зарастают настолько, что их производительность падает в несколько раз. Поэтому в тех процессах, где допустимо использование воды с некоторым содержанием солей, ее жесткость ограничивается еще меньшими значениями –  $0,03–0,05 \text{ мг-экв/л}$  (табл. 1.6, 1.7).

Процессы извлечения из воды солей  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в водоподготовке называют умягчением. Относительно селективное удаление солей жесткости может производиться 3 методами:

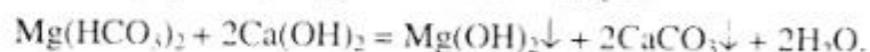
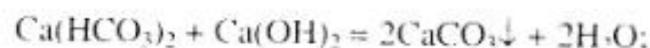
- реагентным умягчением;
- ионным обменом;
- нанофильтрацией.

#### 3.4.1. Реагентное умягчение

Многие соли жесткости имеют низкую растворимость. При введении в раствор некоторых реагентов увеличивается концентрация анионов, которые образуют малорастворимые соли с ионами жесткости  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . Такой процесс называют реагентным умягчением [1, 3–8].

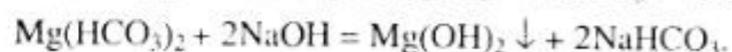
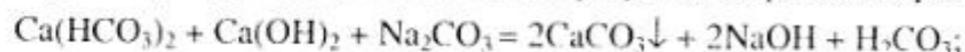
Различают умягчение известкованием и содо-известкованием.

При известковании в раствор добавляют гашеную известь  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  до pH около 10. В результате протекают реакции:



Данный способ используют при высокой карбонатной и низкой некарбонатной жесткости, когда требуется одновременное снижение жесткости и щелочности. Остаточная жесткость на 0,4–0,8 мг-экв/л превышает некарбонатную жесткость. Обычно используется совместно с ионообменным умягчением.

При **содо-известковании** в раствор добавляют гашеную известь  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и соду  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  до pH около 10. В результате протекают реакции:



Как следует из уравнений реакций, в процессе образования и осаждения осадка из раствора извлекаются соли жесткости. Вместе с ними удаляются коллоидные и взвешенные частицы с ассоциированными на них загрязнениями. На хлопьях осадка частично сорбируются органические загрязнения.

При **содо-известковании** за счет избытка ионов  $\text{HCO}_3^-$  достигается большая полнота извлечения солей жесткости. Повышение температуры до 70–80 °С позволяет довести остаточную жесткость до 0,35–1,0 мг-экв/л. Того же результата можно достигнуть увеличением доз реагентов.

Процессы осаждения осуществляются в **отстойниках** и **осветлителях** со взвешенным слоем осадка.

**Отстойники** малопродуктивны, и получаемая в них гидроксидная пульпа имеет высокую влажность – 97–99%. Поэтому они в настоящее время практически не применяются.

В практике используются различные варианты **осветлителей** со взвешенным слоем осадка. В них очищаемый раствор подается снизу и проходит через слой осадка. Это увеличивает коэффициент очистки. Для уменьшения объема шлама используются дополнительные зоны и камеры шламоуплотнения. Увеличение степени осветления достигается введением дополнительных секций тонкослойного отстаивания.

Реагентные методы в подготовке питьевой воды не используются. После них вода имеет сильнощелочную реакцию. Они широко применяются в энергетике и промышленности как первая ступень очистки до механических фильтров. При совместной работе они позволяют умягчить воду, удалить взвешенные вещества, включая коллоиды, и частично очистить ее от органических веществ.

Поскольку осаждение образовавшихся хлопьев происходит очень медленно, производительность оборудования низка и оно имеет большие габариты. В результате образуются отходы в виде трудно утилизируемых шламов. Процесс требует тщательного контроля, причем в ос-

новном ручного, поскольку зависит от многих факторов: температуры воды, точности дозирования реагентов, исходной мутности и т. п.

Новые технологические решения (тонкослойное отстаивание, контактная коагуляция, ввод флокулянтов) позволяют достигнуть тех же показателей при меньших расходе реагентов, габаритах установок и их полной автоматизации.

### 3.4.2. Ионный обмен

В соответствии с современными воззрениями, для питьевой и хозяйственно-бытовой воды оптимальной является жесткость на уровне 1,5 мг-экв/л.

Практически для всех пищевых производств требуется мягкая вода. Для водочного производства установлена предельная жесткость 0,2 мг-экв/л, для производства соков – 0,7 мг-экв/л, для питания паровых котлов – 0,05 мг-экв/л и менее. Многие производители стараются использовать воду еще более высокого качества.

Наиболее просто снижение жесткости до практически любых значений обеспечивается ионным обменом. Производительность метода практически не ограничена [1, 3–8, 19–32, 110, 111, 121, 124, 198–205, 219, 221, 227–233, 235–237, 246].

Умягчение воды может производиться методами Na-катионирования, H-Na-катионирования (параллельное или последовательное) или H-катионирования с голодной регенерацией на сильно- или слабокислотном катионите (рис. 3.3).

Как отмечалось выше, в соответствии с уравнением реакции (2.3), **умягчение воды** производится путем ее контактирования с сильнокислотным катионитом в Na-форме, в результате чего из воды извлекаются катионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  и замещаются ионом  $\text{Na}^+$ . Солесодержание воды при этом практически не меняется, поскольку катионы  $\text{Ca}^{2+}$ , имеющие вес 1 мг-экв равный 20, замещаются катионом  $\text{Na}^+$  с весом 1 мг-экв, равным 23. Поскольку анионный состав не меняется, раствор остается практически нейтральным (рис. 3.4, а). Щелочность воды и pH может увеличиться на 0,1–0,2 единицы, в зависимости от содержания солей жесткости.

Схема ионообменной установки умягчения аналогична показанной на рис. 2.47. В качестве регенерирующего агента используют 6–10% раствор хлорида натрия – поваренной соли. Раствор может готовиться с заданной концентрацией заранее в специальной емкости, либо получаться путем разбавления в эжекторе насыщенного 26% раствора из солерастворителя. В промышленности применяются установки с прямой и противоточной регенерацией.

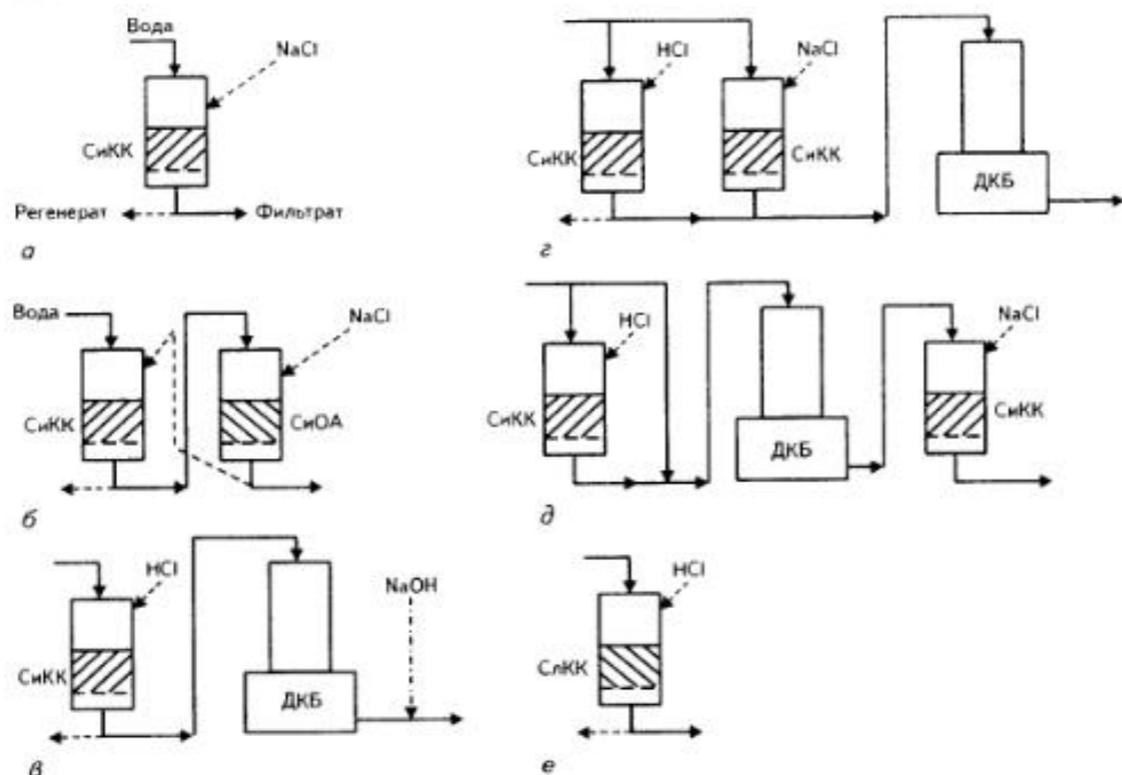


Рис. 3.3. Принципиальные схемы ионитного умягчения:

а – на сильнокислотном катионите СнКК в Na-форме; б – последовательное на СнКК и сильноосновном анионите СнОА; в – на СнКК в H-форме с коррекцией щелочности; г – параллельное H-Na-катионирование; д – последовательное H-Na-катионирование; е – на слабокислотном катионите СлКК

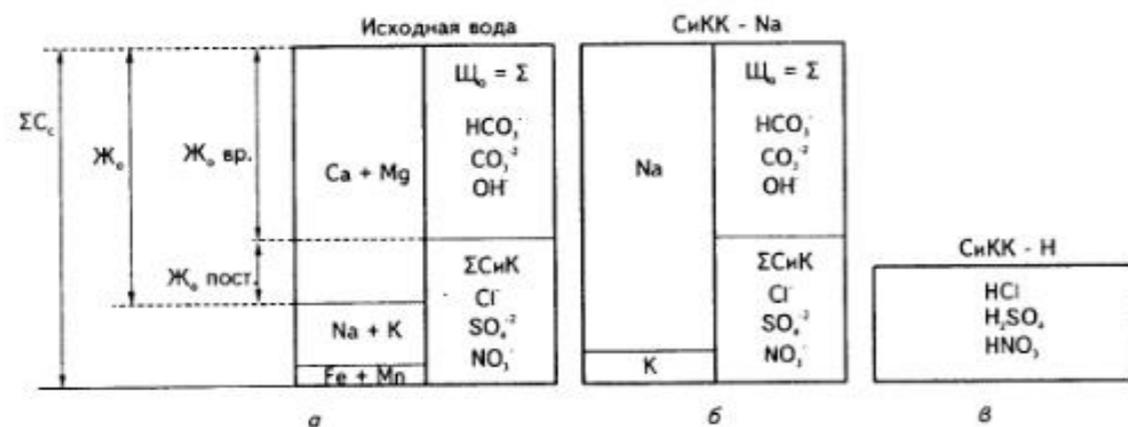


Рис. 3.4. Показатели умягченной воды:

а – исходная вода; после обработки: б – сильнокислотным катионитом в Na-форме СнКК-Na; в – сильнокислотным катионитом в H-форме СнКК-H; г – при параллельном H-Na-катионировании СнКК-Na + СнКК-H; д – слабокислотным

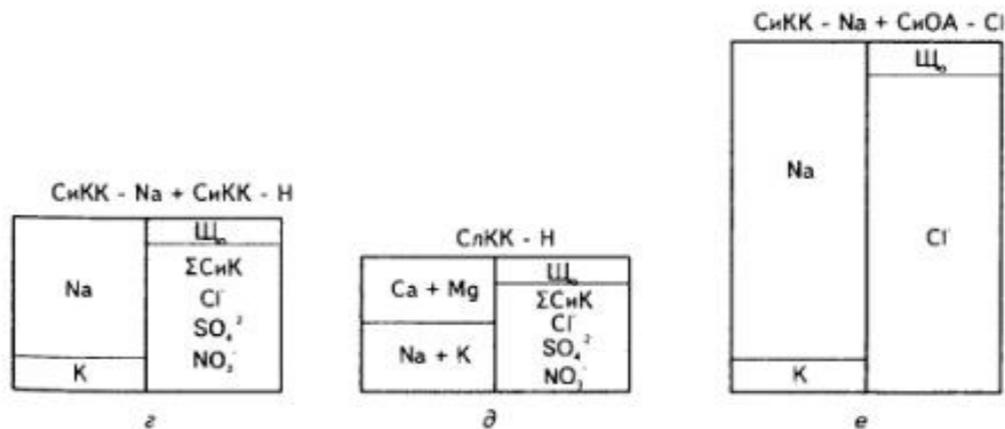
При проточной регенерации зависимость рабочей динамической обменной емкости от расхода соли для сильнокислотного катионита типа IRA 120Na показана в таблице 3.1 [200].

3.1. Зависимость ДОЕ от расхода соли

Удельный расход 100% соли, г/л смолы	80	100	120	150	200
Рабочая обменная емкость, мг-экв/л	1000	1120	1220	1480	1590

Обменная емкость зависит также от концентрации регенерационного раствора (рис. 3.5) и от времени его контакта с катионитом (рис. 3.6). Видно, что при одинаковой дозе соли, максимальная емкость достигается при ее концентрации 6–16%. Оптимальное время контакта составляет 25–35 минут [237].

На одной ступени умягчения при проточной регенерации ионита не удастся снизить жесткость ниже 0,05 мг-экв/л. Для многих процессов в теплоэнергетике требуется меньшая жесткость (табл. 1.7). В этом случае очистку ведут последовательно в двух фильтрах, называемых 1 и 2 ступенью умягчения. Вторую ступень также называют барьерной, которая при нарушении режима работы 1 ступени предотвращает проскок солей жесткости в фильтрат. Поскольку на 2 ступень поступает значительно меньше солей жесткости (в 30–100 раз), скорость раствора на ней может быть много выше, чем на первой. Емкость катионита 2 ступени составляет порядка 500–700 мг-экв/л, поэтому его регенерации проводятся более чем в 10 раз реже, чем первой. Однако для обеспечения высокой глубины при регенерации на 2 ступени расход соли требуется существенно выше, чем на первой.



катионитом в режиме голодной регенерации СлКК-H; е – сильнокислотным катионитом в Na-форме и сильноосновным анионитом в Cl-форме СнКК-Na + СнОА-Cl

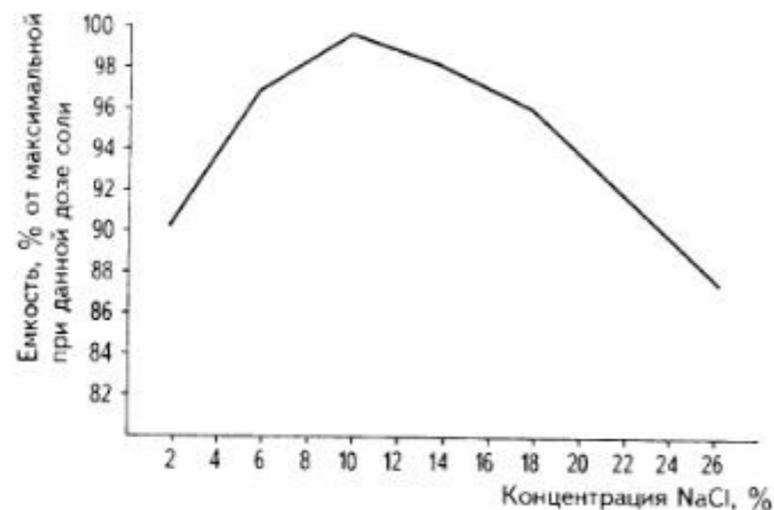


Рис. 3.5. Зависимость обменной емкости от концентрации регенерационного раствора

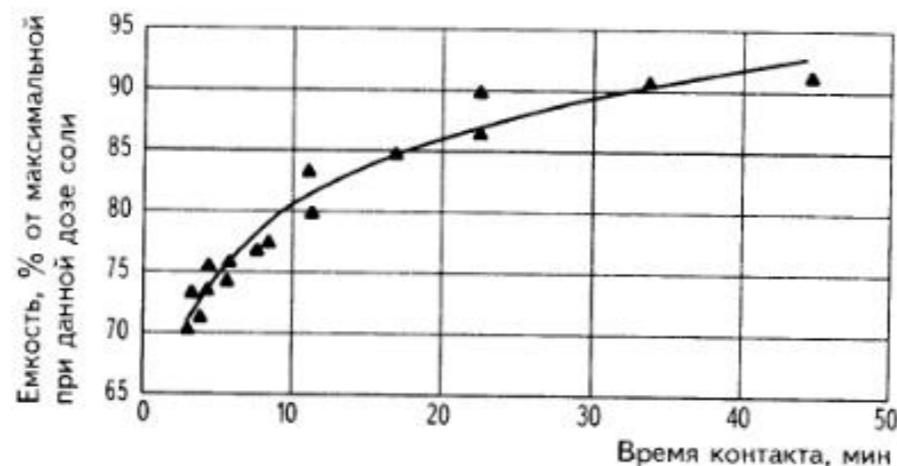


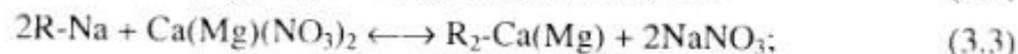
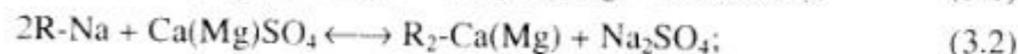
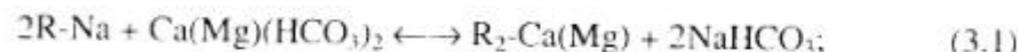
Рис. 3.6. Зависимость обменной емкости от времени контакта регенерационного раствора с катионитом

Наличие двух ступеней очистки позволяет эксплуатировать 1 ступень не до начала проскока, а до полного проскока солей жесткости. Это позволяет более полно использовать ее емкость и, таким образом, экономить регенерационный раствор.

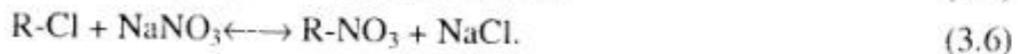
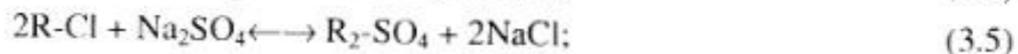
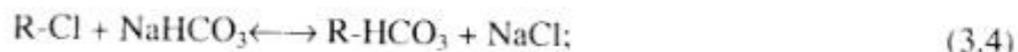
Противоточные установки обеспечивают при том же расходе соли большую степень умягчения или экономию соли (см. выше) [1, 3, 6, 8, 198–208, 211, 212, 221, 233].

Интересным решением вопроса умягчения со снижением щелочности воды является **Na-Cl-ионирование** (рис. 3.3, б) [1, 8, 229, 233]. Оно основано на применении для очистки воды катионита в Na-форме и анионита в Cl-форме. Регенерация обоих ионитов производится одним и тем же раствором NaCl. В этом процессе протекают следующие суммарные реакции:

на катионите:



на анионите:



В результате реакций (3.1–3.3) с сильнокислотным катионитом обрабатываемая вода умягчается до заданного уровня, и в ней остаются только соли натрия. При их контактировании с сильноосновным анионитом в Cl-форме происходит замена бикарбонатных, сульфатных и нитратных анионов на Cl (реакции (3.4–3.6), рис. 3.4, е). При сорбции бикарбонатного иона уменьшается щелочность воды, которая минимальна в начале цикла, а затем постепенно увеличивается. Время работы анионитного фильтра определяется повышением щелочности до заданного предела.

Метод Na-Cl-ионирования применяют при соотношении концентраций анионов в исходной воде  $HCO_3^- / SO_4^{2-} + NO_3^- > 1$  при суммарном содержании сульфатов и нитратов не более 3 мг-экв/л.

Поскольку регенерация катионита и анионита производится последовательно одним и тем же раствором соли, необходимо исключить образование осадка карбонатов кальция в слое катионита. Для этого регенерат после анионита подкисляют, разрушая бикарбонат-ионы. Также трудно сбалансировать объемы ионитов, чтобы они насыщались одновременно. При близких значениях жесткости и щелочности в исходной воде и вдвое-втрое большей емкости катионита, чем анионита, объем последнего должен быть в 2–3 раза больше.

Другими путями являются умягчение воды методами H-Na-катионирования (параллельным или последовательным), H-катионирования с нейтрализацией, H-катионирования с голодной регенерацией на сильно- или на слабокислотном катионите (рис. 3.3, в–е) [1, 3–8, 21, 198–201, 219, 233, 227–236].

Эти способы позволяют свести щелочность к минимуму, а также уменьшить солесодержание воды. Их недостатком является потребность в больших количествах кислоты и специальном кислотостойком оборудовании. Для удаления образовавшейся углекислоты в буферных баках желательно установить распылительные головки или эжекторы-декарбонизаторы.

**Н-катионирование воды** позволяет полностью удалить жесткость и щелочность, а также снизить солесодержание (рис. 3.4, в). При контакте с катионитом в Н-форме из воды извлекаются все катионы, которые замещаются ионом водорода (2.1, 2.2), рН раствора становится равным 2,5–4,0, в зависимости от исходного солесодержания. Во время очистки в воду выделяются катионы водорода, которые реагируют с бикарбонат-ионами по реакции:



Кислотность воды велика, все бикарбонаты полностью переходят в растворенный углекислый газ, который отдувается в декарбонизаторе – ДКБ (рис. 3.3, в, з). Вода после декарбонизатора содержит только анионы сильных кислот и имеет кислую реакцию (рис. 3.4, в). Для ее нейтрализации в воду дозируют раствор щелочи (рис. 3.3, в). В результате очищенная вода имеет минимальную щелочность и жесткость, а содержание катионов соответствует первоначальному содержанию анионов сильных кислот. Снижение солесодержания соответствует исходной щелочности.

При необходимости поддерживать щелочность на определенном уровне при минимальной жесткости применяют параллельное или последовательное **Н-Na-катионирование** (рис. 3.3, з, д). Оба этих режима обеспечивают и некоторое снижение солесодержания воды.

При **параллельном Н-Na-катионировании** часть раствора очищается Н-катионированием на сильнокислотном катионите, а другая часть умягчается Na-катионированием на таком же ионите (рис. 3.3, з). В воде, прошедшей через катионит в Н-форме, удаляются все катионы и вместо них в воду поступает катион водорода, рН раствора становится равным 2,5–4,0 в зависимости от солесодержания. Бикарбонаты полностью разрушаются и присутствуют в виде растворенной углекислоты. В воде, прошедшей через катионит в Na-форме, катионы солей жесткости заменены на натрий, рН не меняется. Обработанные растворы смешиваются в расчетных соотношениях и подаются на декарбонизатор, где удаляют углекислоту. Очищенная вода может иметь остаточную щелочность  $Щ_{ост}$  менее 0,35 мг-экв/л (рис. 3.4, з). Отношение потоков на Н-катионировании –  $Q_{H^+}$  к общему потоку обрабатываемого раствора  $Q_{исх}$  определяется по соотношению:

$$Q_{H^+} / Q_{исх} = C_{\text{HCO}_3^-} - Щ_{ост} / \left[ (C_{\text{SO}_4^{2-}} + C_{\text{Cl}^-} + C_{\text{NO}_3^-}) + C_{\text{HCO}_3^-} \right]$$

Параллельное Н-Na-катионирование используется тогда, когда необходимо иметь остаточную щелочность  $Щ_{ост}$  менее 0,35 мг-экв/л; в исходной воде карбонатная жесткость составляет более 50%, а сумма концентраций солей сильных кислот – менее 5–7 мг-экв/л.

**Последовательное Н-Na-катионирование** (рис. 3.3, д) заключается в пропускании части питающего раствора через катионит в Н-форме, смешении подкисленного раствора с исходным, декарбонизации и умягчении всего потока на катионите в Na-форме. При подкислении воды при Н-катионировании частично разрушается бикарбонат-ион, и связанная с ним жесткость становится некарбонатной. Щелочность перед Na-катионированием поддерживается на уровне 0,7–1,0 мг-экв/л. Поскольку степень извлечения жесткости на Н-катионировании особого значения не имеет, регенерация кислотой может осуществляться без избытка. Такой способ умягчения используется для сильноминерализованных вод с солесодержанием более 1 г/л, когда карбонатная жесткость менее 50% от общей, а щелочность 0,7–1,0 устраивает потребителя.

При «голодной» регенерации сильнокислотного катионита, т. е. регенерации его без избытка кислоты, из воды извлекаются все соли жесткости, а также частично  $\text{Na}^+$ . Резко снижается щелочность, уменьшается рН и солесодержание. Во время очистки все параметры, кроме жесткости, постоянно меняются. Емкость КУ-2-8 в таком режиме не превышает 500 мг-экв/л. Регенерат имеет кислотность, близкую к нейтральной [227].

**Слабокислотные катиониты в Na-форме**, например, С-104, С-107 фирмы «Purolite»; МАС-3 – «Dow Chemical»; IRC 50, 74, 84, 86, IMAC 336 – «Rohm & Haas», позволяют извлечь жесткость на одной ступени очистки до следовых количеств при очень большой обменной емкости – 4000–4500 мг-экв/л. Однако из-за высокого сродства к двухвалентным катионам перевод насыщенного слабокислотного катионита в Na-форму регенерацией солью невозможен. Необходим двухступенчатый процесс: сначала катионит регенерируется кислотой, а затем переводится щелочью в Na-форму. Наряду со сложностью организации такого процесса и большим объемом отходов имеется и дополнительная трудность, связанная с очень большим увеличением объема катионита при его переходе из Н- в Na-форму (рис. 2.38). Последнее приводит к быстрому разрушению катионита. Фильтр с таким катионитом может быть использован как барьерный с огромным ресурсом после одноступенчатого умягчения.

**Слабокислотные катиониты в режиме «голодной» регенерации** кислотой используются для умягчения при одновременном снижении щелочности (рис. 3.3, е) [1, 6, 8, 37, 198–201, 219, 223, 228–236]. Регенерация производится раствором кислоты в количестве, близком к стехиометрическому (рис. 2.40).

При таком режиме регенерации слабокислотный катионит может извлекать только жесткость, ассоциированную со щелочностью (реакции 2.7–2.12). Поэтому остаточная жесткость равна разнице жесткости

и щелочности исходной воды (рис. 3.4, *д*). Остаточная щелочность близка к 0. Во время рабочего цикла значения щелочности и жесткости постоянно изменяются. Очистку прекращают при израсходовании водородных ионов катионита и повышении щелочности. Для получения глубокоумягченной воды после фильтра со слабокислотным катионитом необходимо установить обычный Na-катионитный фильтр или фильтр со слабокислотным катионитом в Na-форме.

Как отмечалось выше, рабочая емкость таких ионитов для вод, где жесткость превышает щелочность, составляет около 2000 мг-экв/л. Это примерно вдвое больше, чем для сильнокислотного катионита, регенерированного с избытком соли (таблица 3.1), и в 3–4 раза выше, чем при его «голодной» регенерации кислотой.

«Голодная» регенерация слабокислотного катионита с практически одинаковым эффектом может проводиться в прямоточном и противоточном режиме.

Поскольку емкость такого катионита велика, при применении серной кислоты очень вероятно выпадение в слое катионита осадка сульфата кальция, гипса – загипсовывание загрузки. Для предотвращения загипсовывания загрузки используется такое свойство образования кристаллов сульфата кальция, как инкубационный период, составляющий примерно 10–15 минут. Поэтому очень важно соблюдать режим подачи серной кислоты при регенерации. Необходимо проводить регенерацию разбавленной кислотой с концентрацией 0,5–1,0%, соблюдая высокую скорость пропускания кислоты и отмывочной воды (не менее 10 м/ч) и не делая перерывов между операциями [198–201, 223, 229–231, 233]. Радикальным решением этой проблемы является использование соляной кислоты.

Оригинальный способ получения высокоумягченной воды с минимальной щелочностью в одном аппарате подразумевает последовательную регенерацию слабокислотного катионита в противоточном режиме раствором кислоты и частичный перевод нижнего слоя катионита в Na-форму разбавленной щелочью. В одном таком фильтре сочетаются последовательно осуществляемые умягчение и снижение щелочности в массе катионита в H-форме и глубокое умягчение в нижнем слое катионита в Na-форме.

Современные установки умягчения воды, использующие сильнокислотные катиониты типа КУ-2-8чс и его импортные аналоги, позволяют при скоростях раствора до 20–40 м/ч умягчать воду с исходной жесткостью 5–10 до 0,05–0,1 мг-экв/л. Регенерация катионита производится солью автоматически, по сигналу счетчика очищенной воды. Внутренняя конструкция фильтра аналогична конструкции механических фильтров и фильтров обезжелезивания. Размеры корпусов фильтров, выполняемых из стеклопластика, также идентичны (табл. 2.3).

Стандартные стальные корпуса отечественного производства рассчитаны для применения на первой и второй ступени умягчения (табл. 2.25). Они имеют большую высоту, чем у механических фильтров (табл. 2.2). Применяются те же типы дренажно-распределительных систем. Внутри фильтры должны иметь антикоррозионную защиту, которая наносится на месте использования аппарата.

Принципиальное отличие установок умягчения состоит в наличии системы приготовления раствора соли и его подачи в фильтр.

Для современных установок-моноблоков разных габаритов рядом с фильтром устанавливается бак-солерастворитель (рис. 3.7). Солерастворитель представляет собой емкость, обычно с ложным дном, в которую загружается запас гранулированной (таблетированной) соли. Во время рабочего цикла в бак подается необходимое количество умягченной воды. Это количество регулируется временем заполнения и клапаном уровня. За время очистки воды происходит растворение соли с образованием насыщенного раствора концентрацией 20–26%. Блок управления снабжен эжектором для подсоса солевого раствора при регенерации, обеспечивающим достаточно стабильное соотношение вода:раствор соли = 2:1 при разном давлении питающей воды. При включении регенерации засасывается насыщенный раствор и разбавляется до 8–10%.

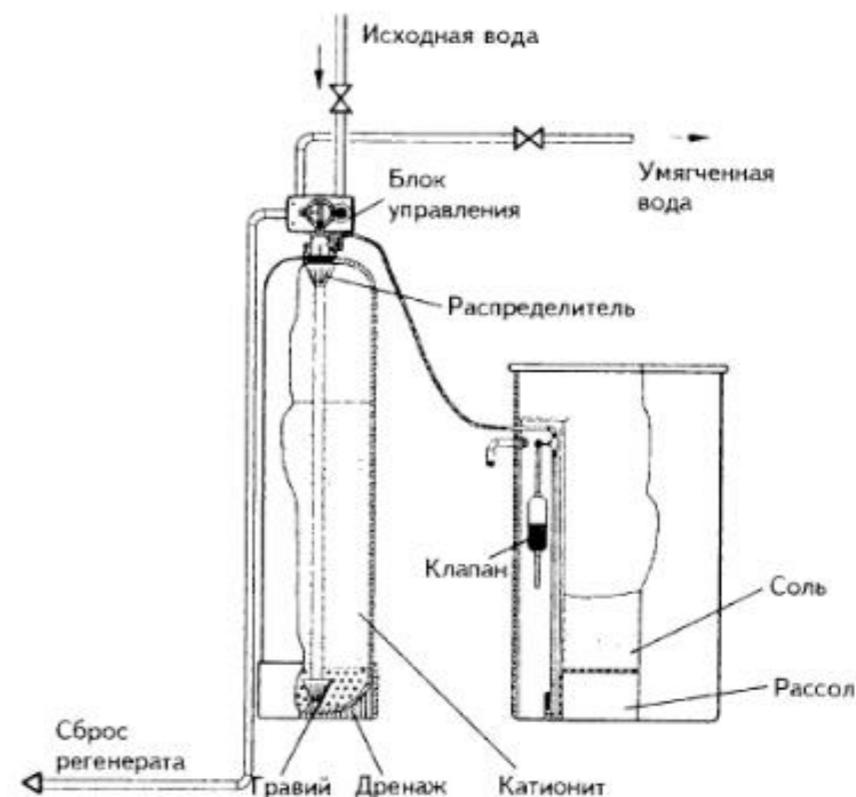


Рис. 3.7. Схема современной установки умягчения воды



Степень умягчения определяется характеристиками применяемых мембран и, поскольку селективность нанофильтрационных мембран к катионам  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  различна (табл. 3.3) [121], зависит от состава воды. В любом случае, степень извлечения солей жесткости ниже, чем при обратном осмосе и тем более чем при ионообменном умягчении.

### 3.3. Умягчение воды мембраной типа NF-70 (Filmtec)

Ион	Концентрация в исходной воде, мг/л	Задержание, %
$\text{Ca}^{2+}$	90	86
$\text{Mg}^{2+}$	2	92
$\text{Na}^+$	19	50
$\text{HCO}_3^-$	270	84
$\text{SO}_4^{2-}$	6	55

Эффективность очистки раствора по различным компонентам показана в таблице 3.4 [121].

### 3.4. Кондиционирование воды на мембране типа NF-70 (Filmtec)

Содержание	Исходная вода	Пермеат
Хлориды, мг/л	64	22
Сульфаты, мг/л	20	8
Солесодержание, мг/л	396	134
Общий органический углерод, мг/л	15,4	1,5
Органические галогены, мкг/м <sup>3</sup>	2000	51
Тригалогенометаны, мкг/м <sup>3</sup>	630	56
Щелочность, мг/л	283	85
Жесткость карбонатная, мг/л	284	22
Жесткость общая, мг/л	316	24
Цветность, градусы	38	2

Характеристики нанофильтрационных рулонных элементов, выпускаемых фирмой Dow Chemical под маркой Filmtec, представлены в таблице 3.5 [111].

Наибольшим достоинством нанофильтрации является снижение не только жесткости, но и щелочности, солесодержания, а также удаление механических, органических и биологических загрязнений при отсутствии необходимости использования реагентов и проблем с солевыми стоками при относительно простой схеме.

Промышленная установка для получения питьевой воды с производительностью 2800 м<sup>3</sup> в сутки состоит из 2 включенных параллельно установок производительностью 60 м<sup>3</sup>/ч. Каждая из них содержит 4 сту-

пени из параллельно включенных 8, 4, 2 и 1 модуля, последовательно соединенных по концентрату. Предподготовка состоит из последовательных блоков микрофильтров с рейтингом 10 и 5 мкм. После установки нанофильтрации вода поступает в декарбонизатор для удаления избытка углекислоты и в узел коррекции pH [111].

### 3.5. Основные характеристики нанофильтрационных элементов Filmtec

Обозначение элемента	Размеры, мм			Площадь фильтрации, м <sup>2</sup>	Производительность, л/ч	Селективность, %
	диаметр элемента	длина	диаметр патрубка пермеата			
NF90-2540	61,0	1016	19,0	2,6	96	99
NF90-4040	99,0	1016	19,0	7,6	290	99
NF90-400	201	1016	29,0	37,2	1183	85–95
NF200-400	201	1016	29,0	37,2	1264	35–50
NF270-400	201	1016	29,0	37,2	2316	40–60
NF270-2540	61,0	1016	19,0	2,6	133	99
NF270-4040	99,0	1016	19,0	7,6	400	99
NF400	201	1016	29,0	37,2	1070	98

Примечание: максимальное давление – 4 МПа, рабочее давление 0,7–1,6 МПа, максимальная рабочая температура – 45 °С, рабочий диапазон pH 3–10, содержание свободного хлора менее 0,1 мг/л.

В очищенной воде отсутствуют бактерии и вирусы, микрзагрязнения и хлорорганика, уменьшены жесткость и содержание сульфатов, имеется возможность сокращения дозы хлора. Установка, базирующаяся на традиционных технологиях, для получения близкого эффекта должна включать несколько стадий очистки.

Недостатком нанофильтрации является меньшая возможная глубина умягчения, необходимость более тщательной предподготовки воды, чем при ионном обмене, и существенно большие потребление воды, электроэнергии и объем отходов. Правда, поскольку последние являются малосолевыми, их сброс существенно легче согласовать с экологическими органами.

Размеры и конструкция рулонных элементов и установок для нанофильтрации и обратного осмоса идентичны. Поэтому они рассмотрены ниже в разделе, посвященном обратному осмосу.

#### 3.4.4. Электрохимическая обработка

Электрохимический метод умягчения воды является относительно новым. Ранее он предлагался для переработки солевых отходов, включая регенераты установок умягчения, для их последующего по-

вторного использования. В РХТУ им. Д. И. Менделеева разработана технология, включающая электрохимическую коррекцию pH очищаемой воды и электрофлотационное отделение твердой фазы [246]. При прохождении воды через межэлектродное пространство происходят процессы электролиза, поляризации, электрофореза, окислительно-восстановительные реакции с деструкцией органических веществ и инактивацией биологических загрязнений. Продукты электролиза взаимодействуют друг с другом с образованием нерастворимых солей.

Принципиальная схема процесса показана на рисунке 3.8. Вода поступает в отстойник 1, где удаляются грубодисперсные вещества. Затем она подается в катодную камеру электрокорректора 2а. Поскольку между камерами 2а и 2б установлена анионообменная мембрана 4, при наложении постоянного тока в катодной камере 2а pH поднимается до 10–11, а в анодной 2б опускается до 3–4. В катодной камере происходит образование частиц гидроксидов и карбонатов смешанного состава. Вода со взвешью поступает в камеры грубой 3а и тонкой 3б очистки электрофлотатора. В электрофлотаторе в результате электролиза воды происходит выделение водорода и кислорода, которые поднимаясь флотируют частицы взвесей, органики, эмульсии, образуя ценный слой – флотшлам, который удаляется специальным устройством. После осветления умягченная вода подается в анодную камеру электрокорректора 2б, где происходит ее нейтрализация до pH, близкого к исходной воде.



**Рис. 3.8.** Схема работы электрокорректора:

1 – отстойник; 2а – катодная камера электрокорректора, 2б – анодная камера электрокорректора; 3а – камера грубой очистки электрофлотатора, 3б – камера тонкой очистки электрофлотатора; 4 – анионообменная мембрана

По данным авторов, качество умягчения достаточно высокое – жесткость ниже 0,1 мг-экв/л. Установка производительностью 5 м<sup>3</sup>/ч занимает площадь 10 м<sup>2</sup> и потребляет 2–3 кВт·ч/м<sup>3</sup> электроэнергии.

Наряду с умягчением происходит очистка воды от органических и биологических загрязнений.

Похожие установки предлагает и НПО «Экран», разработчик серии известных приборов «Изумруд». Они отличаются применением металло-керамических мембран и отделением осадков на фильтре [247, 248].

### 3.5. Обессоливание

Обессоливание воды [1, 3–8, 16–18, 33–39, 42–44, 104, 110–133, 198–205, 209, 211–216, 233, 238–244, 246–251] означает уменьшение содержания в ней растворенных солей. Этот процесс называют также деионизацией, или деминерализацией. Для морских и засоленных (солончатых) вод такой процесс называют опреснением.

Нормами на питьевую воду (табл. 1.2) предусмотрено, что их содержание должно быть менее 1 г/л, и лишь по специальному решению разрешается использовать воду с солесодержанием до 1,5 г/л. Однако в ряде регионов поверхностные и подземные воды содержат больше солей. Морская вода, составляющая основной запас воды на Земле, содержит от 10 до 40 г/л солей. Для использования таких вод для питьевых целей ее подвергают опреснению.

Для многих процессов в теплоэнергетике, химии, электронике требуется вода, содержащая минимальные количества солей, вплоть до сверхчистой, которая практически их не содержит.

Существует несколько способов обессоливания:

- термический;
- ионообменный;
- мембранные;
- обратный осмос;
- электродиализ;
- комбинированные.

Для опреснения засоленных вод используется термический метод, обратный осмос и электродиализ. Потребление при ионном обмене реагентов и объем отходов пропорциональны солесодержанию очищаемой воды, и поэтому его применение считается экономически оправданным при содержании солей до 2 г/л.

Термический метод позволяет обессолить воду с любым солесодержанием. Он требует большого расхода тепла и специальной подготовки воды. Ранее этот метод широко использовался в мире в тех местах, где имелась избыточная тепловая энергия. В СССР единственная установка существовала в г. Шевченко, где использовалось тепло от реакторов типа БН. Она обеспечивала пресной водой потребности города и уранового комбината. В настоящее время выпарные установки предлагаются для процессов подготовки подпиточной воды на ТЭС и для создания комбинированных систем ионного обмена и выпарки для

получения высококачественной воды при минимальных расходе реагентов и объеме отходов в виде твердых солей.

Разработка более совершенных методов термического обессоливания и опреснения резко снизила расход тепла и повысила их конкурентоспособность. Ряд организаций продолжает вести разработку и внедрение таких аппаратов.

Электродиализные установки для опреснения солоноватых вод производились в Алма-Ате институтом Казмеханобр. Это были единственные серийные электродиализные установки в СССР. Они широко распространялись по южным регионам страны. Однако сложность конструкции самих аппаратов и их эксплуатации привели к тому, что реально работали единичные экземпляры. В настоящее время фирма «Эйкос», продолжая работы Казмеханобр, предлагает электродиализные аппараты, имеющие размеры и производительность от бытовых до производственных.

Во всем мире для опреснения морской воды наибольшее распространение получили установки обратного осмоса. Они обеспечивают получение воды с заданным высоким качеством. Лидирующее положение этого метода укрепляется по мере продолжающегося прогресса в технике изготовления мембран и дополнительного оборудования.

Для получения глубокообессоленной (деионизированной) воды используется как чисто ионообменная технология, так и ее комбинация с различными методами очистки, включающая обратный осмос. Термический метод, который ранее был обязателен для получения аширогенной воды для медицинских целей, и здесь уступил место обратному осмосу в сочетании с УФ-облучением.

### 3.5.1. Термические методы обработки воды

Старейшим методом получения обессоленной воды (дистиллята) является термический метод – перегонка, дистилляция, выпарка [1, 4, 8, 33–36, 246–251].

Основой процесса является перевод воды в паровую фазу с последующей ее конденсацией. Для испарения воды требуется подвести, а при конденсации пара – отвести тепло фазового перехода. При образовании пара в него наряду с молекулами воды переходят и молекулы растворенных веществ в соответствии с их летучестью. Для большинства минеральных солей коэффициент распределения составляет  $10^3$ – $10^4$ . Это дает возможность получать из маломинерализованной воды дистиллят с содержанием порядка единиц мг/л, а при опреснении морской воды – с содержанием солей около 100 мг/л. Качество получаемого конденсата определяется также режимом кипения и брызгоуносом, которые зависят от конструкции выпарного аппарата и режима его работы.

Важнейшим преимуществом данного метода являются минимальные количества используемых реагентов и объем отходов, которые могут быть получены в виде твердых солей.

Тепловая и экономическая эффективность метода определяется режимом испарения воды и степенью рекуперации тепла фазового перехода при конденсации пара.

По характеру использования тепла дистилляционные установки подразделяются на одноступенчатые, многоступенчатые и термокомпрессионные.

Одноступенчатая испарительная установка состоит из испарителя, включающего камеру кипения и встроенный или выносной нагревательный элемент, и конденсатора с системой охлаждения. Охлаждающая конденсатор вода частично используется для подпитки испарителя, а основное ее количество с избыточным теплом сбрасывается. В результате на 1 т греющего пара удается получить около 0,9 т дистиллята.

Многоступенчатые испарительные установки включают в себя несколько последовательно работающих испарителей, у которых, начиная со второго, греющим является пар, полученный на предыдущей ступени. Вторичный пар последней ступени конденсируется в конечном теплообменнике, нагревая исходную воду, которая подается в первый испаритель (рис. 3.9).

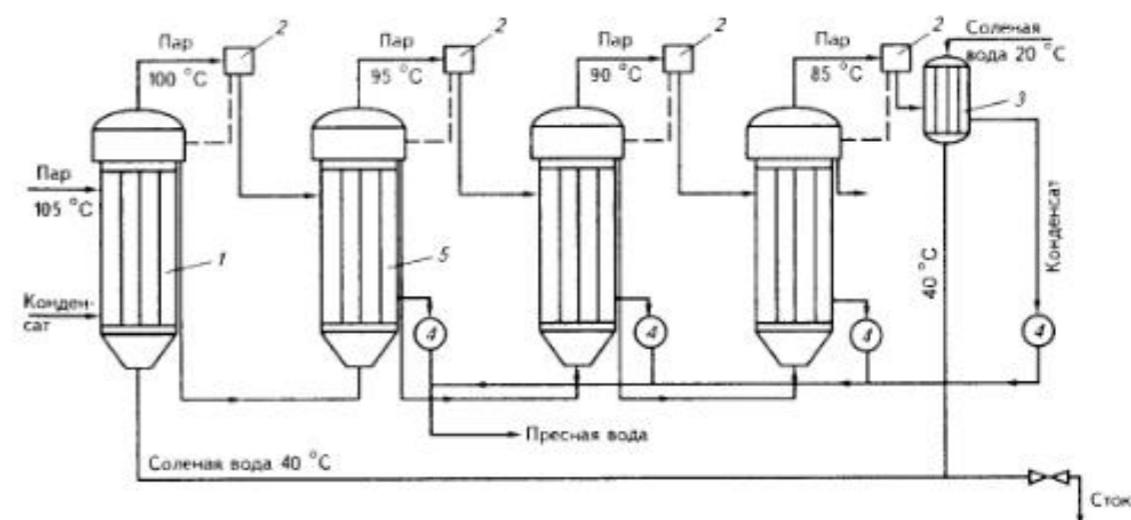


Рис. 3.9. Схема многокорпусной выпарной установки:

1 – первая ступень испарителя; 2 – сепаратор вторичного пара; 3 – конденсатор; 4 – конденсатный насос; 5 – вторая ступень испарителя

Увеличение количества ступеней обеспечивает возрастание количества дистиллята на 1 т первичного греющего пара от примерно 1,5 т для двухступенчатого до 4,2 т для шестиступенчатого испарителей. Предельное число испарителей ограничивается технико-экономичес-

кими показателями и температурным перепадом между первичным и вторичным греющим паром, выбираемым равным 5–10 °С. С учетом этих условий число ступеней практически не превышает 12. В испарителях мгновенного вскипания (см. ниже) оно может быть много больше.

В термокомпрессионных испарителях получаемый вторичный пар отсасывается компрессором, в результате чего в испарителе давление понижается ниже давления насыщенного пара и процесс испарения интенсифицируется. Кроме того, пар сжимается в компрессоре, в результате чего он нагревается до более высокой температуры, чем температура воды в испарителе. Перегретый пар направляется в теплообменник, погруженный в испаряемую воду. Таким образом, используя механическую энергию сжатия, существенно экономят расход пара.

Установки для опреснения морской воды первого поколения были созданы в 1960–70 гг. Они имели 4 ступени с аппаратами с естественной и принудительной циркуляцией по схеме, показанной на рис. 3.9, производительность достигала 600 м<sup>3</sup>/ч. Второе поколение установок имело 10 ступеней испарителей с принудительной циркуляцией или 34 ступени мгновенного вскипания. Они были созданы в 1970 гг. Их производительность также составила по 600 м<sup>3</sup>/ч. Они позволяли получать по 8,0–8,3 тонны дистиллята на тонну пара.

Третье поколение установок представлено модернизированными установками мгновенного вскипания и горизонтально-трубными пленочными испарителями [246–251]. Последние представляют собой горизонтально расположенный пучок труб, которые снаружи орошаются жидкостью, стекающей по ним в виде тонкой пленки и испаряющейся за счет теплоты конденсации пара, поступающего внутрь трубок (рис. 3.10). Коэффициент теплопередачи в пленочном режиме на порядок выше, чем для нагревателей погружного типа. Эти установки предлагаются как для опреснения морской воды, так и для получения обессоленного дистиллята для ТЭС.

В современных установках мгновенного вскипания (рис. 3.11) генерация пара производится за счет адиабатного вскипания воды в свободном объеме при низких температурах 110–40 °С. Количество ступеней в испарителе 16–18, по 8–9 в каждом корпусе. Каждая ступень состоит из камеры расширения и камеры конденсации, которые разделены перегородкой и сообщаются через паровые каналы, снабженные сепараторами. Качество конденсата удовлетворяет нормам для котлов с давлением до 14,0 МПа.

Наибольший интерес представляет использование выпарных установок в сочетании с ионообменными и реагентными схемами. В этих условиях возможно оптимизировать расход реагентов, тепла и решить как экономические, так и экологические проблемы, резко сократив или практически полностью прекратив сброс жидких отходов в окружающую среду [33–36, 246–251].

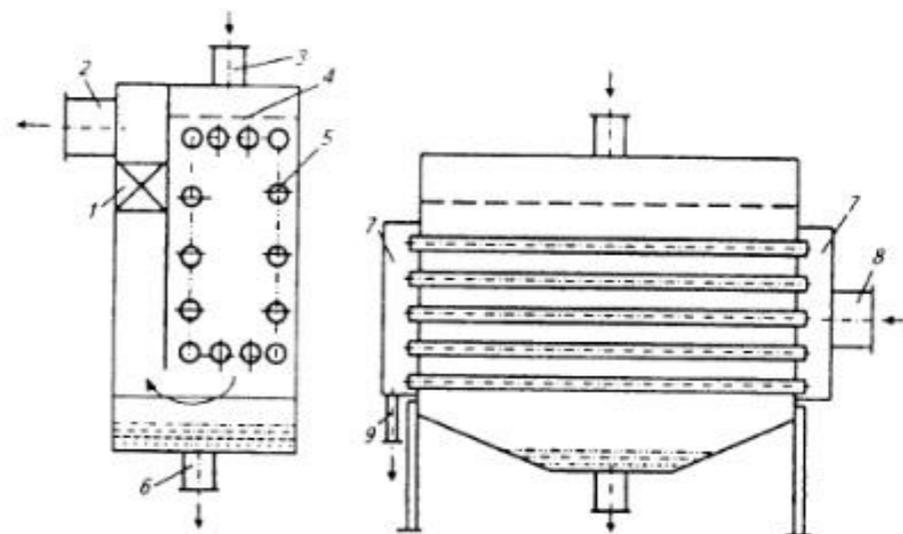


Рис. 3.10. Схема горизонтально-трубного пленочного испарителя:

1 – каплеуловитель; 2 – патрубок выхода вторичного пара; 3 – подача исходного раствора; 4 – распределительное устройство; 5 – трубный пучок; 6 – выход упаренного раствора; 7 – паровые камеры; 8 – подача греющего пара; 9 – выход конденсата

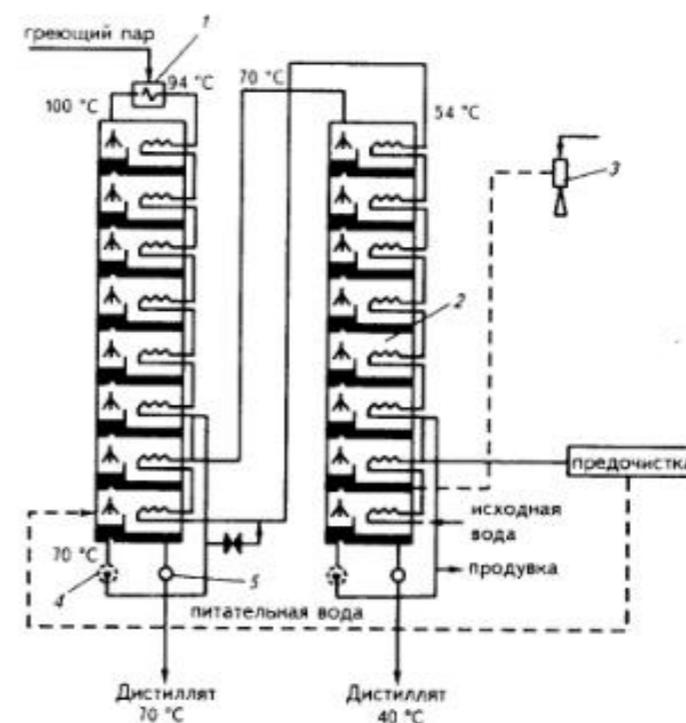


Рис. 3.11. Схема установки мгновенного вскипания:

1 – головной подогреватель; 2 – испаритель; 3 – эжектор; 4 – циркуляционный насос; 5 – дистиллятный насос

### 3.5.2. Обессоливание воды ионным обменом

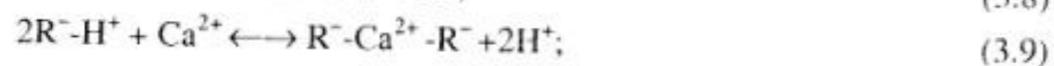
Наиболее часто обессоливание воды производят ионным обменом [1, 3–8, 47–50, 198–209, 211–216, 233]. Это наиболее отработанный и надежный метод.

**Частичное обессоливание** воды происходит при ее умягчении методами Н-Na-катионирования, Н-катионирования с голодной регенерацией, Н-катионирования на слабокислотном катионите. В этих процессах происходит извлечение солей жесткости и частичная их замена на катион водорода, который разрушает бикарбонат-ионы с последующим удалением образовавшегося углекислого газа из воды. Степень обессоливания соответствует количеству удаленного  $\text{CaCO}_3$ .

При **глубоком обессоливании** из раствора удаляются все макро- и микрокомпоненты, т. е. соли и примеси. Степень очистки раствора по каждому макрокомпоненту (катиону и аниону) зависит от их сродства к данному иониту, т. е. от расположения в рядах селективности (раздел 2.3). Подбирая иониты, степень их регенерации и количество ступеней очистки, можно добиться необходимой глубины очистки воды практически любого исходного состава.

Обессоливание может проводиться в одну, две, три ступени или смешанным слоем ионитов.

В каждой ступени раствор последовательно очищается сначала на катионите в водородной  $\text{H}^+$ -форме:

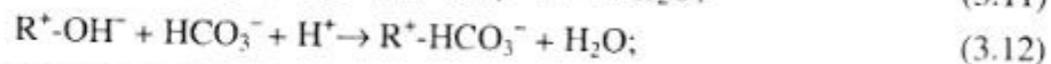
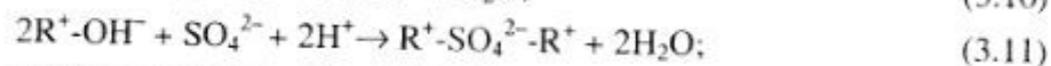
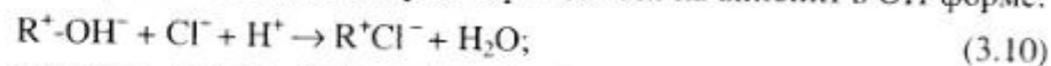


при этом извлекаются все находящиеся в растворе катионы.

Очищенный раствор имеет кислую реакцию, которая зависит от содержания исходного раствора, с рН от 2,2 до 3,5. Присутствующие карбонаты при этом полностью переходят в состояние свободной углекислоты и могут быть эффективно удалены в специальных аппаратах – декарбонизаторах.

Поскольку реакции (3.8–3.9) обратимые, извлечение ионов никогда не происходит до конца. Действует так называемый противоионный эффект. Чем больше извлечено, например, катионов, тем больше в растворе ионов водорода, сдвигающих равновесие реакции влево.

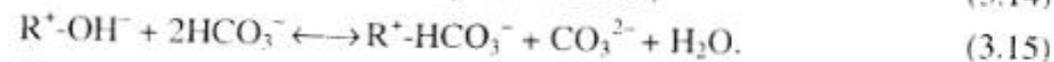
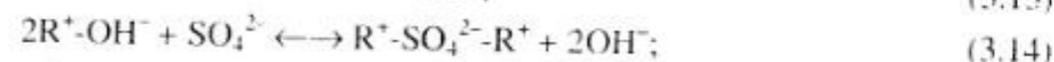
Очищенный от катионов раствор подается на анионит в  $\text{OH}^-$ -форме:



при этом извлекаются все находящиеся в растворе анионы. Очищенный раствор имеет реакцию, близкую к нейтральной (3.5).

Реакции 3.10–3.12 проходят до конца только пока имеются избыточные ионы водорода и конечным продуктом является вода. Такая реакция с высокой эффективностью осуществляется на слабоосновных анионитах.

Более глубокое извлечение анионов может протекать только на сильноосновных анионитах:



При этом рН раствора возрастает.

Такая реакция является равновесной и также не может проходить до конца.

При применении слабоосновного анионита в воде остается большое количество углекислоты в виде бикарбонат-иона, и степень обессоливания оказывается несколько ниже; рН раствора составляет в зависимости от исходной концентрации углекислоты примерно 4,5–6,0.

На одной ступени ионного обмена с сильнокислотным катионитом и сильноосновным анионитом обычно обеспечивается обессоливание в 10–50 раз. Очищенный раствор имеет реакцию, близкую к нейтральной.

Емкость сильноосновного анионита  $\text{SiOA}$  по карбонат-ионам невелика, и для повышения эффективности очистки их удаляют из воды. Для этого вода, прошедшая катионит, и имеющая кислую реакцию, при которой углекислота находится в виде свободной  $\text{CO}_2$ , подается на декарбонизатор. Традиционно декарбонизатор выполняется в виде колонны с кольцами Рашига, орошаемыми водой после катионита, а снизу вентилятором подается воздух. Такие аппараты достаточно эффективны (удаляют до 90–95% углекислоты), но малопродуктивны. Распространение получают эжекторные (вакуумные, струйные) аппараты, базирующиеся на разработках И. Г. Комарчева 1970 гг. Их работа основана на создании высокоскоростного потока в эжекторном устройстве, в котором происходит вакуумирование потока с последующим подсосом воздуха в воду и его отдувкой. При небольших габаритах такая конструкция обеспечивает большую производительность и высокую эффективность удаления растворенных газов, в данном случае свободной  $\text{CO}_2$ .

При необходимости обеспечения большей глубины очистки используют две или три такие последовательно установленные ступени, либо **фильтры смешанного действия ФСД** (рис. 3.12, в, г) [1, 5, 6, 8, 47–49, 198–204, 206, 297, 209, 215, 233]. На каждой последующей ступени происходит доизвлечение оставшихся ионов. Вследствие того, что количество поступающих солей на вторую и третью ступени, на 1–2 порядка меньше, чем на первую, продолжительность их работы в 5–10 раз больше, чем первой.

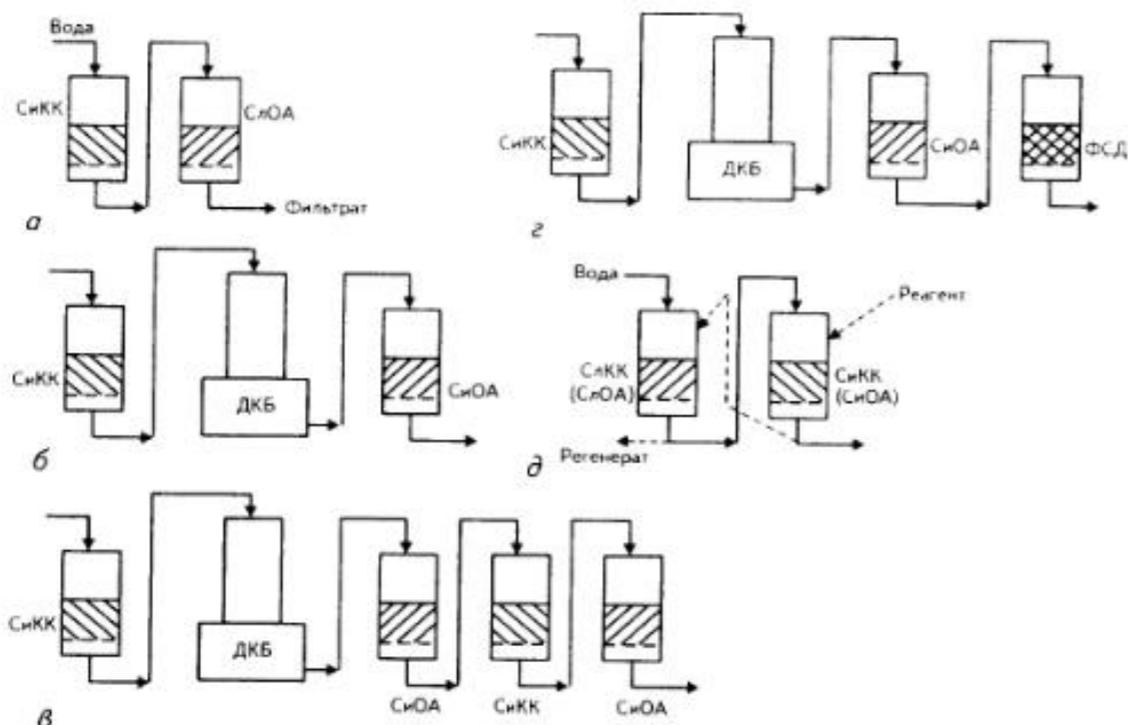


Рис. 3.12. Основные технологические схемы ионитного обессоливания воды:

*а* – обессоливание на сильнокислотном катионите  $СлКК$  и слабоосновном анионите  $СлОА$ ; *б* – на  $СлКК$  и сильноосновном анионите  $СлОА$  с декарбонизатором ДКБ; *в* – глубокое двухступенчатое обессоливание; *г* – обессоливание с фильтром смешанного действия – ФСД ( $СлКК+СлОА$ ); *д* – последовательное включение слабо- и сильно диссоциированных ионитов

Поскольку при контактировании раствора поочередно с катионитом и анионитом рН меняется сначала от 7–8 до 2–3, а затем от 2–3 до 6–7, происходит разрушение комплексных, коллоидных и ряда гидроксидных соединений поливалентных металлов.

На рисунке показаны варианты принципиальных технологических схем ионообменного обессоливания.

После насыщения ионитов их необходимо регенерировать. Для регенерации катионита применяют раствор серной и реже соляной, а для специальных целей – азотной кислоты. Для анионита используется раствор щелочи. Регенерация проводится в прямоточном или противоточном режиме, как описано выше. Полученные регенераты содержат все извлеченные соли и избыток регенерирующего агента. Они являются вторичным отходом, подлежащим переработке. Коэффициент концентрирования составляет от 10 до 100 раз в зависимости от технологии регенерации (прямо- или противоток, концентрация реагентов, вторичное использование регенератов и промвод). Солеосодержание регенератов соответственно составляет от 10 до 50–70 г/л. В них содержится, как

правило, избыток кислоты, который необходимо нейтрализовать. Регенерация фильтров описана выше. Предложено множество различных схем, позволяющих повторно использовать регенераты, однако они очень сложны и практически не применяются.

Для обеспечения высокого качества очистки степень регенерации ионитов 2 и 3 ступеней должна быть максимально высокой. Поэтому расход реагентов на их регенерацию существенно больше, чем на первую ступень.

Широко распространена очистка на **последовательно установленных слабо- и сильнодиссоциированных ионитах** (рис. 3.12, *д*) [1, 6–8, 33–38, 198–201, 209, 223, 226, 232–234]. В основном используют последовательную очистку на слабо- и сильноосновных анионитах. Выше указывалось, что слабоосновные аниониты имеют высокую обменную емкость, но не могут удалять из воды анионы малодиссоциированных кислот – кремниевой, угольной. Сильноосновные аниониты позволяют извлечь эти кислоты, однако их обменная емкость много ниже. Установив последовательно слабо- и сильноосновный аниониты, реализуют их положительные качества. На слабом анионите удаляется основная масса анионов, а на сильном извлекаются оставшиеся загрязнения. В результате обеспечивается высокая рабочая емкость при заданном качестве очистки. Кроме того, слабоосновный анионит значительно более устойчив к действию природной органики. При высоком ее содержании используются специальные аниониты-органопоглотители «скавенджеры», которые предотвращают необратимое загрязнение и выход из строя сильноосновного анионита [198–202, 223–226, 233].

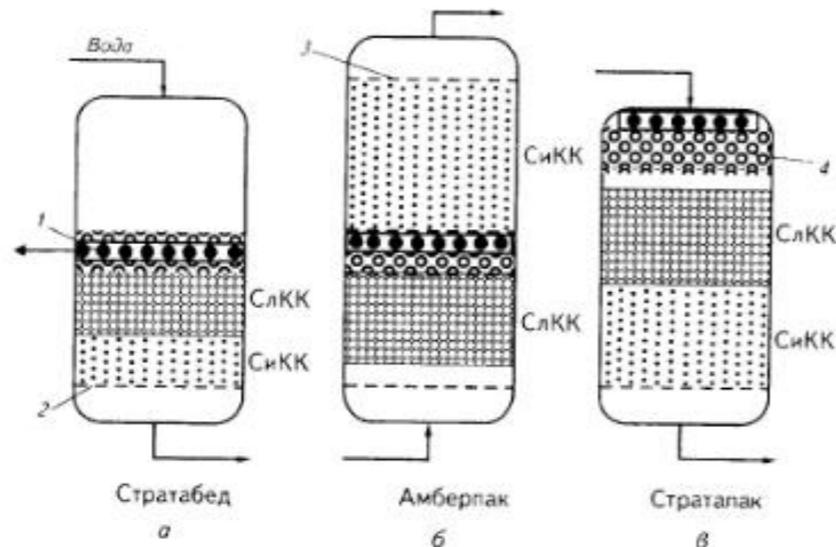
При регенерации раствор щелочи вначале пропускается через фильтр с сильноосновным анионитом, после чего регенерат, содержащий избыток щелочи, подается на фильтр со слабоосновным анионитом. Последний может быть регенерирован практически стехиометрическим количеством щелочи. В результате реагент используется полностью.

Такая схема позволяет сократить размеры используемых аппаратов, количество анионита и резко уменьшить расход щелочи и сброс щелочного раствора.

Аналогично можно применять и последовательное расположение слабого и сильного катионита. К сожалению, в России пока такие процессы не распространены.

Последовательное использование ионитов возможно в стандартных фильтрах либо в специальных конструкциях, в которых иониты расположены послойно. Поскольку движение очищаемого и регенерационного растворов через слои ионитов должно быть противоточным, конструкция таких фильтров должна обеспечивать постоянное нахождение слабого ионита во фронтальном слое. Следует отметить, что слабые иониты имеют плотность меньше, чем у сильных. Поэтому для сис-

тем с фильтрацией сверху вниз, например, Стратабед и Стратанак (рис. 3.13, а, в), необходим только подбор фракционного состава ионитов так, чтобы при их насыщении гидравлическая крупность слабого ионита всегда оставалась меньше, чем у сильного. Расширение и перемешивание слоев в системе Стратабед (рис. 3.13, а) при регенерации предотвращается теми же мерами, что для индивидуального слоя (см. выше). Одновременно с подачей регенерирующего агента сверху подается сжатый воздух или циркулирует регенерат [198, 200, 201, 203, 233].



**Рис. 3.13.** Схемы фильтров с послойным размещением слабо и сильно диссоциированных ионитов:

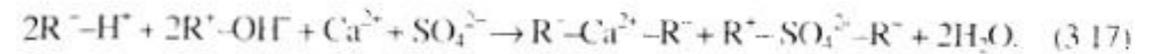
1, 2, 3 – дренажно-распределительные устройства; 4 – инерт

Поскольку в системе с фильтрацией снизу – Амберпак – слабый ионит должен располагаться внизу, приходится разделять корпус фильтра на секции, между которыми устанавливают специальную дренажно-разделительную перегородку (рис. 3.13, б) [198, 200, 201, 203, 233].

Для способа Апкоре и Стратанак слой слабого ионита практически автоматически сохраняется в верхней зоне фильтра без дополнительных устройств (рис. 3.13, в). Его расширению при регенерации препятствует заполнение верхней части фильтра инертными гранулами малой плотности [199, 200, 233].

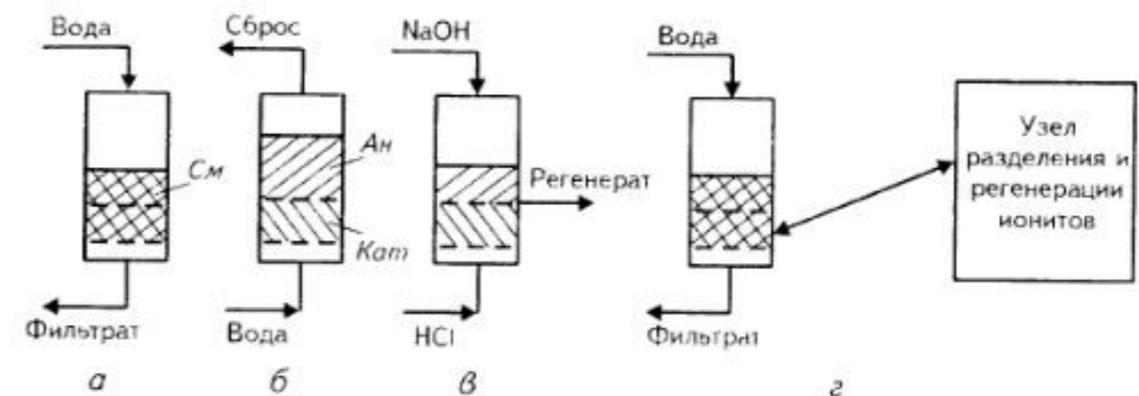
#### Фильтры смешанного действия

Высокую степень очистки можно обеспечить в одном аппарате со смесью катионита в Н-форме и анионита в ОН-форме, т. е. фильтре смешанного действия [1, 5, 6, 8, 47–49, 198–204, 206, 297, 209, 215, 233]. При этом в каждом слое зерен ионитов протекают необратимые реакции:



В этом случае отсутствует противоионный эффект, и из воды за один проход через слой смеси ионитов извлекаются все находящиеся в растворе ионы. Очищенный раствор имеет нейтральную реакцию и низкое солесодержание, примерно в 5–10 раз ниже, чем на одной ступени ионного обмена. Допускается работа с очень высокими скоростями очистки раствора, зависящими от его исходного солесодержания.

После насыщения ионитов (рис. 3.14, а) для их регенерации смесь предварительно необходимо разделить на чистые катионит и анионит.



**Рис. 3.14.** Схемы фильтров смешанного действия с внутренней (а–в) и внешней (г) регенерацией:

а – фильтрация – обессоливание; б – разделение смеси ионитов; в – одновременная регенерация ионитов; г – выносная регенерация; Ан – анионит; Кат – катионит; См – смесь ионитов

Катионит и анионит имеют, как правило, некоторое различие в плотности. Так, плотность частиц стандартного катионита КУ-2-8 составляет в зависимости от ионной формы 1,18–1,23 г/мл. Для анионита АВ-17-8 плотность равна 1,06–1,09 г/мл. Разделение может производиться гидродинамическим методом или путем заполнения фильтра концентрированным 18%-ным раствором щелочи.

При гидродинамическом методе разделение производится путем подачи под слой смеси ионитов воды со скоростью, превышающей скорость псевдооживления самых крупных частиц катионита (рис. 3.14, б). Степень разделения определяется разностью гидравлических радиусов (характеристических скоростей) самых мелких частиц катионита и самых крупных частиц анионита. По мере износа и разрушения частиц катионита они не могут быть отделены от анионита и постоянно находятся в его слое. Эффективность разделения и качество очистки падают.

В настоящее время основными зарубежными производителями ионитов – «Dow Chemical», «Purolite», «Rohm and Haas», «Bayer» выпускаются специально подобранные по плотности и размеру гранул наборы

монодисперсных смол, обеспечивающие высочайшую степень разделения и стабильность показателей (табл. 2.19).

Аппараты со смешанным слоем выполняются с внутренней регенерацией (рис. 3.14, *а-в*), как показано выше, и с внешней, выносной регенерацией (рис. 3.14, *г*). В первом случае после разделения смеси ионитов через их слои пропускают кислоту и щелочь, а затем отмывочную воду (рис. 3.14, *в*). При выносной регенерации очистка производится в одном аппарате, а разделение и регенерация ионитов в другом или нескольких аппаратах, оптимизированных для проведения соответствующих операций (рис. 3.14, *г*). Данный вариант обеспечивает более высокую степень регенерации ионитов и качество очистки.

Из-за сложности операций разделения смеси ионитов и их регенерации такие аппараты используются в основном для очистки малосолевых вод, например, контурных, для глубокой доочистки воды, обессоленной на отдельных слоях ионитов либо обратным осмосом. То есть в тех случаях, когда регенерация проводится редко либо иониты применяются однократно. Наиболее широко смешанные слои ионитов применяют для получения сверхчистой воды с сопротивлением, близким к 18 МОм/см, в энергетике и микроэлектронике – там, где никакие другие способы не могут обеспечить заданное качество.

### 3.5.3. Обратный осмос и нанофильтрация

Извлечение растворенных веществ из воды может производиться мембранными методами [8, 16–18, 104, 110–133, 255–257]. Уровень обессоливания определяется селективностью применяемых мембран. В таблице 2.19 показана степень извлечения различных компонентов мембранными методами. Видно, что достигнуть частичного обессоливания можно методом нанофильтрации, удалив соли жесткости вместе с двухзарядными анионами и частично – однозарядные катионы натрия и калия и анионы хлора. Более глубокое обессоливание обеспечивает низконапорный обратный осмос. Максимальная селективность по всем компонентам обеспечивается обратноосмотическими мембранами, работающими при высоком давлении. Суммарная степень обессоливания зависит от катионного и анионного состава воды и ориентировочно составляет: для нанофильтрации – 50–70%, для низконапорного обратного осмоса – 80–95%, для высоконапорного обратного осмоса – 98–99%.

Основные особенности метода обратного осмоса рассмотрены выше. Отмечалось, что этим методом можно обессоливать воду с различным содержанием солей. Соответственно различают обессоливание пресной воды и опреснение морских и солоноватых вод.

Пресная вода с исходным солесодержанием 0,3–1,0 г/л может быть на одной ступени обратного осмоса обессолена до 5–10 мг/л, т. е. примерно в сто раз, что соответствует селективности распространенных мем-

бран. В случаях, когда не требуется такая глубина обессоливания, могут быть применены менее селективные мембраны для низконапорного обратного осмоса, обладающие большей удельной производительностью.

При опреснении солоноватых и морских вод значительную роль играет осмотическое давление, которое растет с увеличением концентрации солей в питающем растворе. Соответственно для проведения процесса требуется прилагать большее давление. Для получения из воды с содержанием солей до 40 г/л питьевой воды с солесодержанием 300–500 мг/л требуется высокая степень их извлечения. Поэтому в таких процессах применяют высокоселективные мембраны и проводят их при давлении 50–150 атм. Удельная производительность мембран и выход пермеата в этих процессах ниже и, соответственно, они требуют больших энергозатрат. Конверсия или выход пермеата на одной мембране составляет обычно около 10%, а в установке 45–50% из-за высокой концентрации солей, которые могут образовывать осадки на мембранах.

При сравнении различных типов обратноосмотических аппаратов (табл. 2.18) показано, что наибольшую поверхность фильтрации в единице объема имеют аппараты с рулонными элементами и на полых волокнах. Эти же аппараты имеют минимальную материалоемкость и занимают минимальную площадь. Прогресс в разработке плоских мембран, создание широчайшей их номенклатуры по материалам и степени разделения, а также рулонных элементов на их основе, привел к тому, что для процессов обратного осмоса более чем на 90% используются аппараты с рулонными элементами. Оставшийся рынок делят современные аппараты с плоскими мембранными элементами типа «Rochem» и аппараты на полых волокнах.

Как отмечалось выше, обычно обратноосмотические установки строятся по схеме последовательного включения блоков модулей по концентрату, что увеличивает конверсию, т. е. относительный выход пермеата (рис. 2.31). При необходимости получения более глубокой очистки пермеата, его пропускают через второй последовательно включенный блок модулей. При этом концентрат второго блока оказывается менее засоленным, чем питающая вода, и поэтому его подают на вход установки (рис. 3.15). Следует отметить, что при снижении солесодержания селективность мембран падает, и степень обессоливания на втором блоке оказывается ниже, чем на первом. Добиться получения сверхчистой воды методом обратного осмоса практически невозможно.

Для обеспечения нормальной эксплуатации обратноосмотических и нанофильтрационных установок необходимо, чтобы вода, поступающая на мембраны, соответствовала определенным нормам. Кроме того, необходимо обеспечивать подачу исходной воды и отвод концентрата в заданных для данного размера мембран пределах (табл. 2.16).

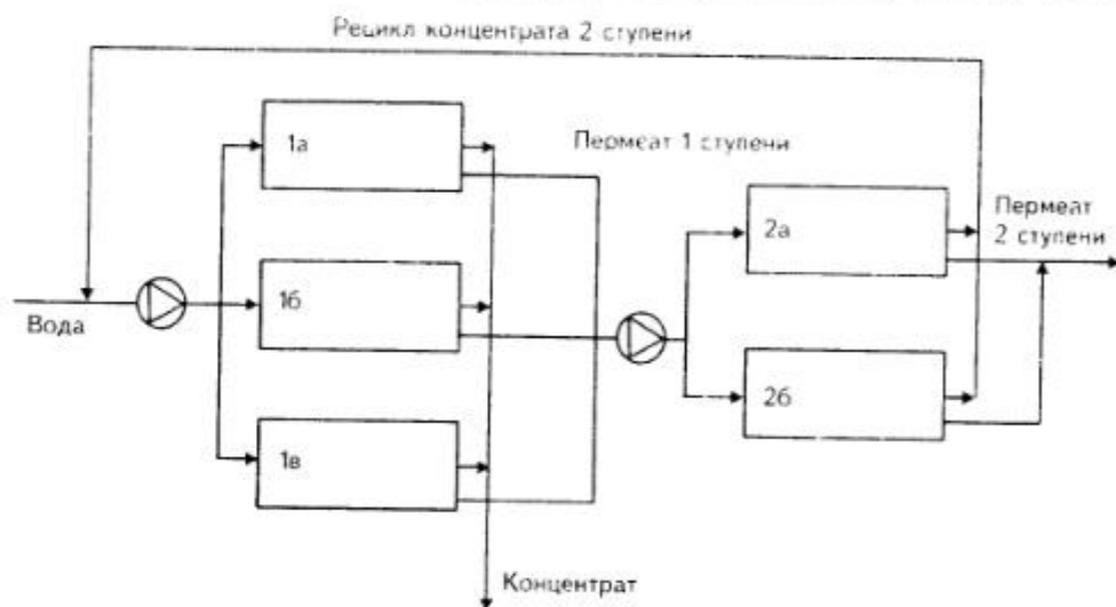


Рис. 3.15. Установка обратного осмоса с двумя ступенями обессоливания:

1 – мембранные элементы 1 ступени; 2 – второй ступени

Подаваемая на мембраны вода должна содержать :

1. менее 1 NTU взвешенных веществ (1 NTU = 0,56 мг/л);
2. менее 4 SDI коллоидных загрязнений (примерно, менее 2–3 мг O<sub>2</sub>/л);
3. свободного хлора менее 0,1 мг/л для композиционных полиамидных мембран и менее 0,6–1,0 мг/л для ацетатцеллюлозных мембран;
4. малорастворимые соли (железа, кальция, магния, стронция) в концентрациях, не вызывающих их отложение на мембранах;
5. микробиологические загрязнения должны отсутствовать;
6. температура подаваемой воды не должна превышать 35–45 °С;
7. pH исходной воды должен находиться в пределах 3,5–7,2 для ацетатцеллюлозных мембран и 2,5–11,0 – для полиамидных.

Для обеспечения указанных требований необходимо обеспечить очистку воды перед ее подачей на мембранную установку. Она включает в себя узлы: механической фильтрации-обезжелезивания, дехлорирования, умягчения или дозирования ингибитора, обеззараживания ультрафиолетом. Видно, что схема такой предподготовки не отличается от схем приготовления воды для многих технологических процессов (см. главу 4). Следовательно, при наличии на предприятии системы водоподготовки, обеспечивающей заданные параметры, можно использовать ее воду для питания мембранной установки.

Взвешенные вещества могут откладываться на поверхности мембран, поэтому установлены такие высокие требования по их содержанию в питающей воде. Однако в любом случае неотъемлемым элементом любой обратноосмотической установки является наличие на ее входе картриджного микрофильтра с патронами, имеющими поры 5 и менее мкм. Производительность такого фильтра должна с запасом обеспечивать расход питающей воды. Такой фильтр гарантирует сохранение мембран при нарушении работы системы предподготовки.

Коллоиды также могут блокировать поверхность мембран. SDI (Silt Density Index) – это обозначение, принятое стандартом ASME Committee как показатель степени загрязнения воды механическими и коллоидными примесями и ее пригодности для подачи в обратноосмотическую установку. При определении SDI производится моделирование процессов осадкообразования на обратноосмотической мембране с использованием микрофильтрации. Этот параметр дает представление о скорости роста гидравлического сопротивления осадка, образующегося на мембране при ее работе.

При превышении рекомендованных значений SDI производится промывка механического фильтра или замена картриджей предочистки.

Сильные окислители – активный хлор, озон и др. – способны разрушать структуру разделительного и поддерживающих слоев мембраны. Это приводит к необратимому снижению ее селективности и прочности. Удаление свободного хлора производится дехлорированием на фильтре с активированным углем насыпного или картриджного типа. Возможно введение в воду сильного восстановителя, например, метабисульфита натрия. Последнее сложнее в организации дозирования реагента и нежелательно для пищевых производств из-за возможности изменения органолептических показателей воды.

Образование осадков на мембранах может происходить вследствие повышения концентрации малорастворимых солей в концентрате и в слое над мембраной. Содержание солей в концентрате определяется конверсией, т. е. соотношением потоков пермеата и исходной воды. При обычной величине конверсии в установке 60–75% содержание солей в концентрате увеличивается в 2,5–4,0 раза. Кроме того, при работе мембраны над ее поверхностью имеется тонкий слой жидкости, в котором концентрация существенно выше, чем в питающей воде или концентрате. И именно в этом слое может происходить образование и выпадение осадков и их осаждение на мембрану.

Наиболее эффективный способ предотвращения образования осадков солей жесткости на мембранах – питание установки умягченной водой. Однако это и самый дорогой способ.

Широко применяется подкисление питающей воды [16–18, 41, 42, 104, 110, 111, 115–120, 126–129]. Доза кислоты, обычно соляной, под-

бирается с таким расчетом, чтобы индекс Ланжелье, характеризующий степень насыщенности раствора карбонатом кальция, был отрицательным даже в концентрате установки. В зависимости от состава исходной воды количество дозируемой кислоты может меняться от 5 до 200 мг/л. Количество введенной кислоты не должно уменьшить pH исходной воды ниже допустимого предела для применяемых мембран (рис. 2.21). Подкисление приводит к понижению pH как исходной воды, так и пермеата. Для многих процессов высокая кислотность обессоленной воды является препятствием к ее использованию.

Дозирование ингибиторов [16–18, 41, 42, 104, 110, 111, 115–120, 129–131] требует существенно меньшего количества реагентов – 4–10 мг/л. Ингибиторы (см. раздел 3.5) замедляют или предотвращают кристаллизацию малорастворимых солей из раствора. В качестве ингибиторов применяют комплексные соединения высокомолекулярных органических кислот, например, фосфоновых. В процессе мембранного разделения комплексон полностью задерживается мембраной и выводится с концентратом.

Применение ингибиторов не является панацеей. Они имеют ограниченную область применения по концентрации малорастворимых солей. Так, их не рекомендуется применять при содержании железа в воде более 1 мг/л, SiO<sub>2</sub> – более 150 мг/л, CaSO<sub>4</sub> – более 8 г/л и т. п.

Следует учесть, что при повышении концентрации малорастворимых солей необходимо увеличивать дозу ингибитора, что существенно снижает экономическую целесообразность его применения.

Импортные ингибиторы обычно снабжаются рекомендациями по их дозированию в зависимости от состава воды. Отечественный препарат Аминат-К, к сожалению, не снабжается такими указаниями.

Поскольку отработанный ингибитор сбрасывается вместе с концентратом, важна и его токсичность. Аминат-К имеет ПДК для вод хозяйственно-бытового назначения 4,0 мг/л, а для рыбохозяйственных водоемов – 0,1 мг/л. Для импортных ингибиторов с неизвестным составом таких данных нет. Этот аспект их применения также необходимо учитывать.

ГНУ ВНИИ пищевой биотехнологии для использования воды, очищенной методом обратного осмоса, в процессах производства пищевых продуктов, например, соков, водки и т. п., рекомендует использовать в качестве предочистки только умягчение воды [126–128]. Это объясняется опасением возможности попадания в очищенную воду следов комплексона, которые могут ухудшить органолептические показатели воды. Следует также учитывать, что для многих пищевых процессов необходима вода с определенным солевым составом, который получают путем смешения в необходимом соотношении вод, очищенных на установках умягчения и обратного осмоса.

Важным аспектом при заказе и разработке мембранных установок является учет температуры питающей воды. Все показатели мембран даются для температуры 25 °С. В реальных условиях температура, как правило, существенно ниже. Зависимость производительности от температуры для мембран типа Desal фирмы Osmonics показана в таблице 3.6.

### 3.6. Коэффициент температурной коррекции

Материал	Температура, °С (°F)						
	4 (40)	10 (50)	16 (60)	21 (70)	25 (77)	27 (80)	32 (90)
Ацетатцеллюлоза	0,55	0,66	0,77	0,90	1,0	1,04	1,20
Полиамид	0,48	0,60	0,73	0,88	1,0	1,06	1,26

Соответственно при расчете установки необходимо устанавливать такое количество элементов, которое обеспечит заданную производительность при снижении температуры. Причем количество элементов, как следует из таблицы 3.6, может требоваться почти в 2 раза больше, чем при стандартной температуре. Это существенно повышает стоимость установки. В ряде случаев, при наличии дешевого тепла, выгоднее производить предварительный подогрев питающей воды.

Поскольку в морской воде в больших количествах присутствуют различные микроорганизмы и органические соединения, а также взвеси, предварительная подготовка воды перед мембранной установкой требуется значительно более сложная. Наряду со ступенями механической фильтрации она включает узлы разрушения и удаления органики и инактивации биологических объектов с помощью окисления, например, озонированием.

При опреснении морской воды, имеющей значительно большее солесодержание, чем пресная, применяют высокоселективные мембраны и проводят процесс при давлении 50–150 атм. Характеристики мембранных элементов отличаются от тех, что предназначены для обессоливания пресной воды. Так, для стандартного элемента SWC фирмы Hydronautics рабочее давление составляет 5,5 МПа. При температуре 25 °С, конверсии 10%, pH 6,5–7,0 и селективности 99,6% производительность стандартного элемента 4040 составляет 4,5, а 8040 – 22 м<sup>3</sup> в сутки. При этом расход питающей воды составляет 3,6 и 17,0 м<sup>3</sup>/ч соответственно.

Новым направлением в организации предподготовки воды перед обратным осмосом и нанофильтрацией является использование ультрафильтрации [104–108, 110]. Она позволяет полностью исключить попадание на мембраны взвесей, крупных органических и микробиологических загрязнений. Это существенно улучшает работу установок и продлевает межрегенерационный период. Как указано выше, новые способы реализации ультрафильтрационной очистки воды на мембранах, с регенерацией обратным током, существенно снизили затраты и объем отходов.

Параметры работы установки обратного осмоса должны находиться в определенных пределах, описанных в разделе 2.1.3. Изменяя в этих пределах давление и температуру исходного раствора, расход пермеата и концентрата, можно корректировать качество очищенной воды (табл. 3.7). Увеличение давления приводит к росту потока пермеата и за счет некоторого уплотнения мембран – к повышению селективности и, соответственно, к снижению проскока солей. Рост температуры снижает вязкость воды и повышает подвижность ионов солей, что приводит к росту как производительности, так и проскока солей. Повышение концентрации солей в питающей воде, при неизменных ее расходе и степени конверсии приводит, за счет повышения концентрационной поляризации на поверхности мембраны, к снижению производительности и к закономерному повышению проскока солей в пермеат.

При увеличении степени конверсии расход пермеата уменьшается, проскок солей увеличивается.

### 3.7. Параметры питающего раствора, влияющие на ОО

Увеличение параметра	Расход пермеата	Проскок соли
Давление	↑	↓
Температура	↑	↑
Концентрация	↓	↑
Конверсия	↓	↑

#### Отмывка и санитарная обработка мембран

При работе мембранных установок происходит постепенное снижение их производительности. Оно обуславливается загрязнением мембран образовавшимися на поверхности отложениями малорастворимых солей и микрочастиц взвесей, прошедших через фильтры предочистки, а также образованием биопленки. Выпадение осадков происходит особенно интенсивно при нарушении расчетного режима эксплуатации мембранной установки или системы предочистки.

Для предотвращения отложения кристаллических загрязнений и удаления коллоидной пленки с поверхности мембран необходимо производить профилактические регенерационные промывки [41, 42, 104, 110, 111, 116–120, 126–129, 255–257]. Технология промывки адаптированными моющими ингредиентами позволяет полностью восстановить производительность установки. Регенерационные промывки производятся по следующим признакам:

- снижение производительности установки на 10–15% с учетом температурной коррекции при постоянном давлении;
- увеличение сопротивления мембранного блока на 10–15% при поддержании неизменной производительности;

- при снижении селективности мембран на 10–15%;
- через заданный интервал времени эксплуатации установки, который определяется опытным путем.

Широко применяемые полиамидные композиционные мембраны устойчивы при pH 2–12, что позволяет производить их отмывку как кислотными, так и щелочными композициями. Их применимость определяется характером загрязнений, свойственных для конкретной установки с определенными типом мембран, и параметрами питающей воды. Кислотные рецептуры используются для удаления неорганических осадков, таких как карбонаты и сульфаты кальция и магния, гидроокиси железа и алюминия. Щелочные рецептуры предназначены в основном для удаления органических загрязнений, содержащих биологические и глинистые вещества, соединения кремния, гуминовых и фульвокислот. Основными компонентами рецептур являются неорганические (соляная, фосфорная) и органические (лимонная, щавелевая) кислоты, щелочи, органические и неорганические комплексообразователи, а в некоторых случаях окислители и восстановители. Их концентрация выбирается такой, чтобы pH моющего раствора не выходил за пределы стойкости мембран (рис. 2.21).

Как правило, цикл регенерации состоит из нескольких операций, включающих: циркуляционную промывку регенерационным раствором и отмывку установки от остатков раствора.

Обратноосмотические и нанофильтрационные мембраны являются абсолютно непроницаемыми для любых микроорганизмов. Поэтому вода после обработки на таких установках, при их правильном конструировании и эксплуатации, является стерильной. С другой стороны, большая поверхность мембран, над которой концентрируются микроорганизмы, органические загрязнения и соли, является идеальным местом для их размножения, особенно при наличии на поверхности мембран микрослоя осадка. Размножаясь, микроорганизмы (микрофлора) блокируют поверхность мембраны, ухудшая ее производительность, и могут повреждать разделительный слой, снижая селективность. Особенно это характерно для ацетатцеллюлозных мембран.

Для предотвращения биозагрязнения мембранных установок необходимо обеспечивать биологическую чистоту всего тракта предочистки – механических и ионообменных фильтров, буферных емкостей. Особенно интенсивное обсеменение оборудования происходит при работе с длительными остановками. Замечено, что при перерыве в работе в несколько суток, все фильтры установок водоподготовки для производства соков и водки оказывались обсемененными. Для дезинфекции было необходимо проведение комплекса мероприятий, включающих регенерацию и обработку дезинфицирующими составами.

Удаление образовавшейся биопленки проводится путем санитарной обработки мембранной установки. Для дезинфекции могут использоваться окислители – перекись водорода и надуксусная кислота – и неокислители – формальдегид, глутеральдегид, четвертичные аммониевые основания, а также медный купорос. Из-за высокой токсичности используемых веществ необходима тщательная отмывка установки после санитизации. Санитизация может быть совмещена с регенерационной промывкой от осадков.

Осуществляя регулярные регенерационные промывки мембран, удастся поддерживать паспортную производительность и селективность мембранных установок в течение 3 и более лет.

#### 3.5.4. Сравнение методов обессоливания

Авторы различных установок обессоливания предлагают многочисленные сравнения их экономической эффективности, естественно, в пользу своих разработок [35, 38, 104, 110–112, 117–119, 132, 249, 251, 254]. Ранее, в 1960–1980 гг., считалось, что до 2 г/л выгодно использование ионного обмена, а при большем – выпарки. Разработка и совершенствование всех методов обессоливания, особенно стремительное усовершенствование мембранных процессов, постоянно меняет соотношение стоимостей установок и очищенной воды. Кроме того, в настоящее время все большую роль играет экологичность процессов, т. е. количество сбрасываемых в окружающую среду солей. Следует отметить, что многие положительные и отрицательные качества этих процессов зависят от солесодержания обрабатываемого раствора.

При обессоливании воды ионным обменом пропорционально солесодержанию питающей воды растут объем ионитов и оборудования, а также расход реагентов, т. е. капитальные и эксплуатационные затраты. Даже при оптимально организованной регенерации (противоток) с минимальным избытком реагентов в сточные воды поступают извлеченные соли и использовавшиеся реагенты в количестве 1,1–2,0 от количества солей. Суммарное количество составляет 2,1–3,0. Следует учитывать, что эти соли находятся в небольшом объеме регенератов, соответственно, в высокой концентрации. Регенераты, как правило, имеют кислую реакцию и требуют дополнительной нейтрализации. Прямой сброс таких отходов запрещен. Обычно используется метод разбавления другими стоками. Эксплуатационные расходы практически прямо пропорциональны солесодержанию исходной воды (рис. 3.16).

В обратном осмосе производительность мембранных элементов, расход энергии и, соответственно, капитальные и эксплуатационные затраты незначительно зависят от солесодержания (рис. 3.16). При обратном осмосе количество солей в стоках близко к их количеству в питающей воде. Дополнительным источником солей являются составы для промывки мем-

бран. Суммарное количество сбрасываемых солей пропорционально солесодержанию исходной воды и, при правильном расчете и эксплуатации установки, превышает его на 5–15%. К сожалению, известны случаи, когда из-за неверно выбранных условий эксплуатации приходится промывать мембраны столь часто, что сброс токсичных солей оказывается во много раз больше. Сбросные воды – концентрат обратного осмоса – имеют солесодержание в 2,5–4,0 раза большее, чем исходной воды, т. е. 1–2 г/л, и состав, соответствующий ей. Это дает возможность сброса стоков без больших проблем.



Рис. 3.16. Сравнение зависимости стоимости очистки воды ионным обменом и обратным осмосом от солесодержания воды при одинаковой производительности

Сравнивая стоимость очистки воды обратным осмосом и ионным обменом (рис. 3.16), можно отметить наличие точки пересечения прямых, соответствующих каждому методу. Положение этой точки у разных авторов сильно различается: от 600–800 мг/л до 100–150 мг/л. Последнее вряд ли может соответствовать реальности. Корректно эта точка может быть определена только для заданного состава воды при сравнении реальных установок с учетом всех расходов. Так, эксплуатационные расходы при обратном осмосе существенно зависят от способа предотвращения выпадения осадков. При применении ингибиторов их количество растет пропорционально содержанию солей жесткости. При умягчении ионным обменом необходимо учитывать расходы на эту операцию, которые также растут пропорционально содержанию солей жесткости. Кроме того, необходимо учитывать стоимость исходной воды, расход которой при обратном осмосе примерно в 1,5 раза выше, чем при ионном обмене и выпарке, а также стоимость сброса отходов.

Следует отметить, что корректное сравнение методов может быть проведено только для конкретных условий. Так, по данным фирмы Rohm & Haas [200], при использовании современного ионообменного

оборудования во многих случаях метод ионного обмена экономичнее обратного осмоса.

Для глубокого обессоливания однозначно эффективнее ионный обмен.

При опреснении морской воды корректно сравнивать энергозатраты на проведение процесса (табл. 3.8) [132]. Отчетливо виден прогресс в совершенствовании дистилляции и обратного осмоса, которые в настоящее время являются основными конкурентами. Ионный обмен в этих условиях не используется.

### 3.8. Расход энергии на опреснение морской воды

Метод опреснения	Расход энергии, МДж/м <sup>3</sup>			
	1955–1970 гг.	1970–1980 гг.	1980–1990 гг.	1990–2000 гг.
Дистилляция	2900–950	950–350	350–130	150–50
Кристаллизация	800–300	300–200	–	–
Электродиализ	–	400–300	300–200	200–100
Обратный осмос	–	300–200	200–100	50–15

Следует отметить преимущества каждого из методов.

Ионный обмен:

- возможность получения сверхчистой воды;
- отработанность и надежность;
- способность работать при резко меняющихся параметрах питающей воды;
- минимальные капитальные и энергозатраты;
- меньший расход питающей воды;
- минимальный объем вторичных отходов, обеспечивающий возможность их переработки.

Обратный осмос:

- высокое качество воды по взвешам, биологическим и органическим загрязнениям;
- минимальное количество реагентов и суммарный сброс солей в окружающую среду;
- возможность сброса концентрата без обработки в канализацию;
- относительно низкие эксплуатационные затраты;
- отсутствие агрессивных реагентов и необходимости их обработки.

Термический метод:

- минимальное количество реагентов и сброс солей в окружающую среду;
- высокое качество воды по взвешам;
- возможность получения отходов минимального объема, вплоть до сухих солей;

- возможность использования избыточного тепла;
- удаление из воды растворенных газов.

Их недостатками являются:

Ионный обмен:

- высокий расход агрессивных реагентов;
- эксплуатационные расходы, растущие пропорционально солесодержанию воды;
- необходимость обработки регенератов и сложности с их сбросом.

Обратный осмос:

- необходимость тщательной предподготовки;
- желательность непрерывной работы установки;
- большие капитальные затраты;
- большой расход питающей воды и объем сбросных вод;
- большие энергозатраты.

Термический метод:

- необходимость предподготовки;
- большие энергозатраты;
- большие капитальные затраты.

В таблице 3.9 приведено оценочное сравнение методов обессоливания по трем уровням: минимальный – Мин, максимальный – Макс и средний – Ср.

### 3.9. Оценочное сравнение методов обессоливания

Параметр	Ионный обмен	Обратный осмос	Электродиализ	Выпарка
Надежность	Макс	Ср	Мин	Макс
Степень обессоливания	Макс	Ср	Мин	Ср
Удаление органики	Мин	Макс	Мин	Ср
Удаление микрофлоры	Мин	Макс	Ср	Макс
Удаление взвесей	Мин	Макс	Мин	Макс
Удаление растворенных газов	Мин	Мин	Мин	Макс
Требования к предподготовке	Мин	Макс	Макс	Ср
Энергозатраты	Мин	Макс	Макс	Макс
Расход реагентов	Макс	Мин	Мин	Мин
Расход питающей воды	Мин	Макс	Макс	Мин
Объем отходов	Мин	Макс	Ср	Мин
Возможность переработки отходов	Макс	Мин	Мин	Макс
Возможность сброса отходов	Мин	Макс	Ср	Мин

По мнению автора, в настоящий момент наилучшие экономические, экологические и технологические показатели имеют комбинированные схемы, когда первая стадия обессоливания осуществляется безреагентным методом – обратным осмосом или выпаркой, а глубокая доочистка – ионным обменом. Такая схема позволяет сократить по сравнению с «чистым» ионным обменом расход реагентов и объем солевых стоков примерно в 10 раз при максимальном качестве очистки. Именно такой вариант наиболее часто употребляется во всех разрабатываемых и строящихся в России и за рубежом схемах получения высокочистой воды для энергетики, электроники и медицины. В качестве примера в главе 4 приводятся краткие описания схем водоподготовки для ТЭС.

При необходимости получения отходов в твердом виде оптимальна комбинация указанных методов с термическим.

### 3.6. Кондиционирование воды

Вода, используемая для питьевых целей, производства различных продуктов должна обладать определенными свойствами и химическим составом. Наряду с необходимостью обеспечить содержание токсичных веществ в концентрациях ниже допустимых, часто требуется, чтобы в ней присутствовали полезные для данного производства вещества в заданных количествах, соблюдались определенные значения pH и щелочности. В энергетике необходимо обеспечение такого состава и (или) физического состояния примесей, которые не образуют накипи и не вызывают коррозии металлов.

Процесс доведения состава воды до заданных, необходимых для данного процесса, параметров называют **кондиционированием**. Как правило, он включает ряд операций, при которых удаляются загрязнения, а затем вводятся соответствующие реагенты [1, 3–12, 19, 24, 29–31, 116–120, 126–128, 258–278].

#### 3.6.1. Стабилизационная обработка воды для тепловых процессов

При использовании воды в качестве теплоносителя к числу важнейших ее качеств относятся отсутствие выпадения осадков на поверхностях теплообмена и минимальная коррозионная активность.

Стабильной называют воду, которая не вызывает коррозии поверхности металла, с которой она соприкасается, и не выделяет на этих поверхностях осадки карбонатов кальция [1, 3–12, 258–278].

Стабильность определяется индексом Ланжелье как:

$$J = \text{pH} - \text{pH}_s,$$

где  $\text{pH}_s$  – это pH равновесного раствора, насыщенного карбонатом кальция;  $\text{pH}_s$  определяется расчетным путем или по номограмме [5].

Коррозионная активность воды, т. е. ее агрессивность по отношению к металлам, проявляется, когда индекс стабильности  $J$  является отрицательной величиной ( $J < 0$ ).

Если индекс стабильности больше единицы ( $J > 1$ ), то на стенках начинается отложение карбоната кальция.

Вода, которая используется в качестве теплоносителя, должна иметь индекс стабильности  $J$ , близкий к 0.

Для поддержания стабильности воды в заданных пределах необходимо регулировать несколько параметров: pH, щелочность или карбонатную жесткость. Стабильность увеличивается при введении карбонатов натрия или кальция, подщелачивании, а уменьшается при умягчении воды или введении кислоты.

Выпадение осадков солей жесткости, железа резко ухудшает эффективность теплообмена и приводит к росту тепловых потерь и экономичности установок. Существуют жесткие нормативы на содержание солей жесткости в воде для различных энергетических установок (таблицы). Для их удаления используются различные рассмотренные выше химические методы.

Для систем, работающих при невысоких параметрах теплоносителя, предлагаются физические и химические методы, которые позволяют предотвратить выпадение осадков на поверхностях теплообмена без химического умягчения воды. Эти методы приводят к связыванию солей жесткости в кристаллические структуры, не имеющие адгезии к поверхностям теплообмена, и остающиеся в растворе.

**Физическое воздействие** – это магнитная и радиоволновая обработка воды [4, 5, 259–264].

В последние несколько десятилетий в России и за рубежом активно пропагандируется применение **магнитной обработки воды** для парогенераторов низкого давления и малой производительности, в тепловых сетях и системах горячего водоснабжения, в различных теплообменных аппаратах. Сторонники этого метода указывают на простоту, дешевизну, безопасность и безреагентность такого метода.

Магнитная обработка воды заключается в пропускании потока воды через магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом или электромагнитом, перпендикулярно магнитным силовым линиям. Скорость потока воды может составлять 1–3 м/с.

Механизм взаимодействия магнитного поля с водой и растворенными солями окончательно не определен. Считается, что под воздействием поля происходят поляризационные процессы с диполями воды и ионами солей, которые приводят к формированию центров кристаллизации и образованию кристаллических взвесей солей жесткости не на теплообменных поверхностях, а в объеме раствора. В результате вместо твердой накипи в воде появляется тонкодисперсный шлам, который легко удаляется

с поверхности теплообменников и трубопроводов. Более того, происходит растворение образовавшихся ранее отложений [259–263].

На практике эффект магнитной обработки зачастую проявляется только в первый период эксплуатации. Затем происходит «привыкание» воды. Считается, что свои свойства омагниченная вода сохраняет меньше суток. Поэтому в тепловых сетях, кроме омагничивания питательной воды, необходимо омагничивать всю воду, циркулирующую в системе.

Омагничивание применяют, если:

- вода подогревается до температуры не выше 95 °С;
- карбонатная жесткость не превышает 9 мг-экв/л;
- содержание растворенного кислорода не более 3 мг/л, а сумма хлоридов и сульфатов не более 50 мг/л;
- содержание двухвалентного железа не превышает 0,3 мг/л [260].

В 90-х годах прошлого века появились *аппараты для радиочастотной обработки воды* [263]. В таких аппаратах на воду воздействует высокочастотное излучение, создаваемое специальным генератором и изменяющееся по заданной программе. Передача энергии в воду происходит посредством излучателей, которые представляют собой несколько витков провода, намотанных на трубопровод. Механизм действия аналогичен магнитному воздействию – соли жесткости переводятся в нерастворимую кристаллическую фазу, которая взвешена в потоке воды. Разработчики приборов уверяют, что отсутствует эффект «привыкания», а также рекомендуют применять такую воду для питьевых целей.

Не оспаривая наличия некоторого эффекта физического воздействия на воду, можно отметить, что отсутствует надежная статистика реальной эффективности таких методов. Данные разных авторов очень сильно различаются.

**Химическая обработка** заключается во введении в воду малых доз специальных реагентов, связывающих соли жесткости, которые остаются в растворе и не прикипают к греющим поверхностям [1, 3–12, 19, 24, 29–31, 116–120, 126–128, 258, 264–277].

Различают два класса стабилизирующих реагентов: реагенты, связывающие соли жесткости во взвешенные в воде кристаллические образования, и реагенты, стабилизирующие насыщенные растворы.

К реагентам, которые связывают соли жесткости в малорастворимые соединения, прежде всего относятся различные фосфаты. В промышленности применяются: тринатрийфосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , динатрийфосфат  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , мононатрийфосфат  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ , гексаметафосфат  $\text{Na}_2[\text{Na}_4(\text{PO}_4)_6]$ , триполифосфат  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ . В результате реакций растворенных солей кальция и магния с ними образуются мелкокристаллические фосфаты кальция и магния, которые оказываются взвешенными в слое воды.

Реакцию образования гидроксилапатита можно представить уравнением:



которое показывает, что для получения гидроксилапатита необходимо не только наличие анионов  $\text{PO}_4^{3-}$ , но и щелочной среды. В зависимости от щелочности обрабатываемой воды используются различные вышеперечисленные фосфаты. В результате гидролиза всех фосфатных солей образуется раствор тринатрийфосфата, диссоциирующий затем до анионов  $\text{PO}_4^{3-}$ . Например, гексаметафосфат натрия  $\text{Na}_2[\text{Na}_4(\text{PO}_4)_6]$  реагирует по реакции:



Следует отметить, что в максимальной концентрации  $\text{PO}_4^{3-}$  содержится в гексаметафосфате натрия.

При добавлении фосфатов в количестве меньшем, чем содержание Ca, Mg и Fe, образуются труднорастворимые фосфатные комплексы этих элементов. Они образуют на внутренних стенках трубопроводов плотную пленку, которая предотвращает непосредственное соприкосновение воды с металлом, защищая его от коррозии.

Фосфатирование позволяет допускать повышенную щелочность воды без выпадения осадков карбонатов кальция.

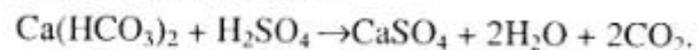
Близким по методу воздействия обладает широко рекламируемый метод «Гидро-Икс» разработки датской фирмы «Hydro-X» [269–272]. Предлагаемый ей раствор имеет в своем составе щелочь для регулировки значения pH, тринатрийфосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  и шесть органических соединений, которые способствуют выделению солей кальция и магния и стабилизации образовавшихся микрочастиц, поглощают кислород и создают защитный слой на теплообменных поверхностях. При обработке воды раствором «Гидро-Икс» количество базовых веществ – щелочи и тринатрийфосфата, – по утверждению разработчиков, на порядок меньше стехиометрического. Количество раствора «Гидро-Икс» при постоянной дозировке составляет примерно 0,2 л на 1 м<sup>3</sup> добавочной воды и 0,04 л на 1 м<sup>3</sup> конденсата. При использовании в качестве добавочной умягченной воды, постоянная дозировка составляет 0,04 л на 1 м<sup>3</sup> добавочной воды и конденсата.

Однако, по данным отечественных исследователей, основным действующим веществом является щелочь, количество которой близко к стехиометрическому количеству [269–272].

Следует отметить, что все описанные выше методы требуют удаления образующихся взвесей путем продувки системы или фильтрации теплоносителя.

К способам обеспечения стабильности воды относятся умягчение (см. соответствующий раздел) и введение реагентов, стабилизирующих насыщенные растворы солей, таких как кислоты и различные комплексоны.

Добавление кислоты в воду приводит к переходу карбонатной жесткости в некарбонатную:



При этом  $\text{CaSO}_4$  имеет большую растворимость, чем  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , а растворенная углекислота предотвращает нарушение карбонатного равновесия. Кислота должна вводиться в стехиометрическом количестве. При ее недостатке возможно выпадение осадка, а при избытке – увеличение коррозии оборудования. В современных установках целесообразно подавать приготовленный раствор кислоты насосом-дозатором, включенным в систему пропорционального дозирования или дозирования по поддержанию стабильного значения величины pH (см. ниже).

Комплексоны называют группу органических соединений, которые способны образовывать устойчивые комплексные соединения с катионами металлов [1, 3–8, 258, 264–268, 273–277]. В теплоэнергетике комплексоны применяются для решения ряда задач:

- стабилизации растворенных в воде соединений солей жесткости и железа для предотвращения их распада и образования осадков накипи;
- ингибирования коррозии металлического оборудования;
- удаления отложений накипи и продуктов коррозии с поверхностей теплообменного оборудования.

Классическим примером комплексона, используемого в теплоэнергетике, является трилон Б – двузамещенная натриевая соль ЭДТА. Он образует растворимые комплексные соединения с кальцием, магнием, железом, медью и др. комплексообразователями. Для полного связывания 1 мг-экв солей жесткости расход трилона Б составляет 168 мг, на 1 мг железа – 6 мг, на 1 мг меди – 2,7 мг. Трилонирование как технологический процесс не получило широкого распространения из-за высокой стоимости трилона Б.

В настоящее время на рынке предлагается широчайший ассортимент комплексонов, пригодных для самых разных условий, как импортного, так и отечественного производства – Аминаты, ИОМСы [264–277]. Их основой являются производные органической фосфоновой кислоты, например, оксиэтилиденфосфоновой кислоты – ОЭДФ. Особенностью фосфорорганических комплексонов является их способность даже при малых концентрациях тормозить образование кристаллов карбонатов солей жесткости и предотвращать образование накипи. При этом соединения ОЭДФ с некоторыми металлами являются активными ингибиторами коррозии углеродистых сталей. Поскольку количество вносимого комплексона незначительно (1–5 мг на л подпиточной воды), расходы на такую обработку су-

щественно меньше, чем при ее умягчении. По термической устойчивости комплексоны могут применяться до температуры 130 °С. Они могут быть эффективно использованы для отопительных систем, малой энергетики, тепловых сетей и котлов с соответствующими параметрами пара.

### 3.6.2. Кондиционирование питьевой воды

Вода природных источников может, с одной стороны, содержать различные загрязнения, а с другой стороны, в ней могут отсутствовать вещества, необходимые для нормальной жизнедеятельности. Удалению вредных загрязнений посвящены все предыдущие разделы. Одновременно с вредными могут извлекаться и полезные для организма вещества. Для создания необходимого солевого состава воды в нее вводят недостающие соли [1, 3–15].

Как правило, в воде наблюдается дефицит фтора, йода.

Кроме того, питьевая вода должна быть стабильной. В противном случае в процессе доставки к потребителю она окажется загрязненной продуктами коррозии трубопроводов. Это особенно актуально для вод, прошедших очистку методами опреснения и обессоливания. Как правило, стабилизация такой воды производится путем ее пропускания через известковые минералы. Их растворение происходит до прихода системы в стабильное состояние, т. е. насыщения ее солями жесткости до уровня, соответствующего имеющемуся солесодержанию и pH.

Кондиционирование путем добавления необходимых солей производится методом дозирования их раствора в поток воды. Так, концентрация фтора в воде должна находиться в интервале от 0,7 до 1,2 мг/л. При концентрации меньшей, чем 0,5 мг/л, необходимо вводить реагенты, содержащие фтор в высокой концентрации; при большей – удалять избыточный фтор. В качестве таких реагентов применяют фтористый натрий, кремнефтористый натрий, кремнефтористый калий, кремнефтористый аммоний, фтористый кальций. Следует отметить, что все эти вещества являются ядами. Методы введения указанных солей подробно описаны в работах [7, 8]. В современных установках целесообразно вводить приготовленный раствор реагента насосом-дозатором, включенным в систему пропорционального дозирования (см. ниже).

Другим путем, используемым для систем с малой производительностью, является применение специальных ионообменных смол, имеющих в своем составе фтор или йод. При контакте с водой происходит медленное выделение этих компонентов. ОАО НИИПМ производит в ограниченном количестве такие материалы: катионит-фторатор КУ-фторатор и бактерицидный анионит БА-1, содержащий йод [278, 279]. Недостатками этих продуктов наряду с высокой ценой является неравномерность выделения полезного компонента в воду и, в результате, непредсказуемость его концентрации [222].

### 3.6.3. Кондиционирование воды для пищевой промышленности

Как отмечалось выше, для получения стабильной ликероводочной продукции, соков и питьевой воды необходимо поддержание в очищенной воде, которая является сырьем, не только заданного солевого состава, прежде всего жесткости, но и определенной щелочности. Последняя в большинстве природных вод оказывается выше заданной. Поскольку щелочность определяется, как количество  $0,1$  н соляной кислоты, необходимой для титрования по метилоранжу, наиболее простым способом ее корректировки является введение в воду необходимого количества кислоты. Могут быть использованы различные кислоты, допущенные для применения в пищевой промышленности [64, 117].

Доступных приборов непосредственного автоматического контроля щелочности нет. Поэтому возможно два варианта: контроль pH после смешения и пропорциональное дозирование. Типичная зависимость pH от щелочности представлена на рис. 3.17. Для каждого состава воды она индивидуальна. Выбрав контрольные точки, определяют режим работы дозирующего насоса. Более дешева и проста система дозирования пропорционально расходу воды. Подробнее системы корректировки щелочности описаны в работах [117, 299, 300] и в примерах схем водоподготовки (см. ниже).

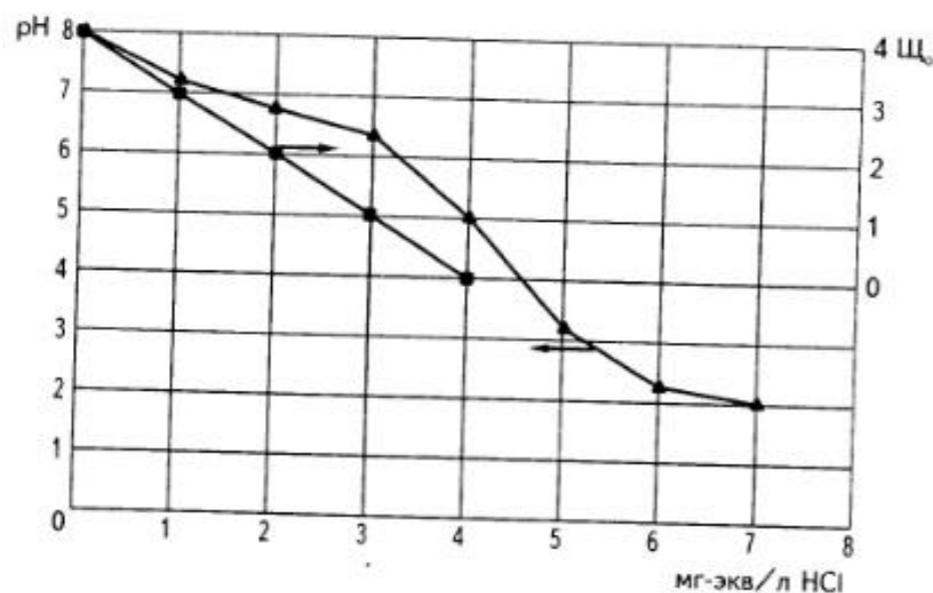


Рис. 3.17. Типичная зависимость pH и щелочности ( $Щ_0$ ) воды от количества введенной соляной кислоты

Другими путями контролируемого уменьшения щелочности являются: умягчение воды на слабокислотном катионите, Na-H-ионирование, обессоливание обратным осмосом или нанофильтрация, которые описаны выше.

В производстве пива требования к составу воды противоречивы, например, необходимо иметь достаточное количество солей кальция, при отсутствии магния. Обычными способами селективно извлечь магний невозможно. Поэтому часто используют метод обессоливания воды с последующим вводом необходимых реагентов. Таким образом создают солевой состав воды, идентичный для производства определенного сорта пива данного производителя, в любой точке Земли. Обычно обессоливание производят обратным осмосом, см. раздел 3.4.

### 3.7. Обеззараживание питьевой воды

Под обеззараживанием питьевой воды [7–15, 109, 135–174, 278–294] понимают мероприятия по уничтожению в воде бактерий и вирусов, вызывающих инфекционные заболевания. По способу воздействия на микроорганизмы методы обеззараживания воды подразделяются на химические, или реагентные; физические, или безреагентные, и комбинированные. В первом случае должный эффект достигается внесением в воду биологически активных химических соединений; безреагентные методы обеззараживания подразумевают обработку воды физическими воздействиями, а в комбинированных используются одновременно химическое и физическое воздействия.

К химическим способам обеззараживания питьевой воды относят ее обработку окислителями: хлором, озоном и т. п., а также ионами тяжелых металлов. К физическим – обеззараживание ультрафиолетовыми лучами, ультразвуком и т. д. Перед обеззараживанием вода обычно подвергается очистке фильтрацией и (или) коагуляцией, при которой удаляются взвешенные вещества, яйца гельминтов и значительная часть микроорганизмов.

При химических способах обеззараживания питьевой воды для достижения стойкого обеззараживающего эффекта необходимо правильно определить дозу вводимого реагента и обеспечить достаточную длительность его контакта 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.

При физических способах необходимо подвести к единице объема воды заданное количество энергии, определяемое как произведение интенсивности воздействия (мощности излучения) на время контакта.

Зараженность воды микроорганизмами контролируют, определяя общее число бактерий в 1 мл воды и количество индикаторных бактерий группы кишечной палочки (БГКП). Основной вид этой группы – *E. coli* –

определяется проще, чем другие бактерии этой группы. БГКП присутствуют в воде, загрязненной фекалиями, и при этом обладают одним из самых высоких коэффициентов сопротивляемости обеззараживанию. Будучи безвредной, *E. coli* является контрольным микроорганизмом, характеризующим бактериальное загрязнение воды. По СанПиН 2.1.4.1074-01 общее число бактерий должно быть не более 50 при отсутствии в 100 мл колиформных бактерий. Мерой зараженности является так называемый коли-индекс, т. е. содержание *E. coli* в 1 литре воды.

Однако эта норма не всегда коррелирует с обеззараживанием воды от вирусов. При дозах УФ-излучения и хлора, обеспечивающих одинаковый эффект обеззараживания по коли-индексу, воздействие ультрафиолета на вирусы (вируцидный эффект) значительно сильнее, чем в случае применения хлора. Озонирование же по вируцидной активности практически не уступает УФ-облучению. Реальные практические дозы для достижения высокого вируцидного эффекта: 0,5–0,8 г/л озона при контакте 12 мин; при УФ-облучении – 16–40 мДж/см<sup>3</sup>.

Наиболее распространенным методом обеззараживания воды был и остается метод хлорирования. Это объясняется высокой эффективностью, простотой используемого технологического оборудования, дешевизной применяемого реагента – жидкого или газообразного хлора – и относительной простотой обслуживания.

Очень важным и ценным качеством метода хлорирования является его последствие. Если количество хлора взято с некоторым расчетным избытком, так чтобы после прохождения очистных сооружений в воде содержалось 0,3–0,5 мг/л остаточного хлора, то не происходит вторичного роста микроорганизмов в воде.

Взаимодействие хлора с микроорганизмами описано выше.

Одновременно с обеззараживанием воды протекают реакции окисления органических соединений, при которых в воде образуются хлорорганические соединения, обладающие высокой токсичностью, мутагенностью и канцерогенностью. Последующая очистка воды на активном угле не всегда может удалить эти соединения. Кроме того, что эти хлорорганические соединения, обладающие высокой стойкостью, становятся загрязнителями питьевой воды, они, пройдя через систему водоснабжения и канализации, вызывают загрязнение рек вниз по течению.

Хлор является сильнодействующим токсическим веществом, требующим соблюдения специальных мер по обеспечению безопасности при его транспортировке, хранении и использовании; мер по предупреждению катастрофических последствий в чрезвычайных аварийных ситуациях. Поэтому ведется постоянный поиск реагентов, сочетающих положительные качества хлора и не имеющих его недостатков.

Предлагается применение диоксида хлора [7, 8, 148–151], который обладает рядом преимуществ, таких как: более высокое бактерицидное

и дезодорирующее действие, отсутствие в продуктах обработки хлорорганических соединений, улучшение органолептических качеств воды, отсутствие необходимости перевозки жидкого хлора. Однако диоксид хлора дорог, должен производиться на месте по достаточно сложной технологии. Его применение имеет перспективу для установок относительно небольшой производительности.

Применение для обеззараживания хлорсодержащих реагентов (хлорной извести, гипохлоритов натрия и кальция) менее опасно в обслуживании и не требует сложных технологических решений. Правда, используемое при этом реагентное хозяйство более громоздко, что связано с необходимостью хранения больших количеств препаратов (в 3–5 раз больше, чем при использовании хлора). Во столько же раз увеличивается объем перевозок. При хранении происходит частичное разложение реагентов с уменьшением содержания хлора. Остается необходимость устройства системы притяжно-вытяжной вентиляции и соблюдения мер безопасности для обслуживающего персонала. Растворы хлорсодержащих реагентов коррозионно-активны и требуют оборудования и трубопроводов из нержавеющей материалов или с антикоррозийным покрытием.

Все большее распространение, особенно на небольших станциях водоподготовки, приобретают установки по производству активных хлорсодержащих реагентов электрохимическими методами. В России несколько предприятий предлагают установки типа «Санер», «Санатор», «Хлорэл-200» для производства гипохлорита натрия методом диафрагменного электролиза поваренной соли [152–154].

Озонирование [7–15, 156–174] основано на свойстве озона разлагаться в воде с образованием атомарного кислорода, разрушающего ферментные системы микробных клеток и окисляющего некоторые соединения, которые придают 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 в 8–15 мин; количество остаточного озона должно составлять 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. При высокой степени обеззараживания оно обеспечивает ее наилучшие органолептические показатели и отсутствие высокотоксичных и канцерогенных продуктов в очищенной воде.

Однако в связи с большим расходом электроэнергии, использованием сложной аппаратуры и необходимостью высококвалифицированного обслуживания, озонирование нашло применение для обеззараживания питьевой воды только при централизованном водоснабжении.

Метод озонирования технически сложен и наиболее дорогостоящ. Технологический процесс включает последовательные стадии очистки

воздуха, его охлаждения и осушки, синтеза озона, смешения озоноздушной смеси с обрабатываемой водой, отвода и деструкции остаточной озоноздушной смеси, вывода ее в атмосферу. Все это требует также дополнительного вспомогательного оборудования (озонаторы, компрессоры, установки осушки воздуха, холодильные агрегаты и т. д.), объемных строительно-монтажных работ.

Озон токсичен. Предельно допустимое содержание этого газа в воздухе производственных помещений  $0,1 \text{ г/м}^3$ . К тому же существует опасность взрыва озоноздушной смеси.

Следует отметить, что, хотя ряд зарубежных фирм предлагает автономные озонаторные установки для организации водоснабжения отдельного коттеджа или очистки воды в бассейне, кроме очень высокой стоимости таких устройств, требуется обеспечение их высококачественного обслуживания. Применение установки, предлагаемой одной из отечественных фирм [174], для автономного водоснабжения без всяких систем контроля содержания озона в воздухе и воде, может печально кончиться для ее владельцев. В этих условиях возможно применение дозирования в воду гипохлорита, получаемого в малогабаритном электролизере типа «Санатор», хотя и здесь требуется квалифицированное обслуживание.

Применение тяжелых металлов (медь, серебро и др.) для обеззараживания питьевой воды основано на использовании их «олигодинамического» свойства – способности оказывать бактерицидное действие в малых концентрациях. Эти металлы могут вводиться в виде растворов солей либо методом электрохимического растворения [7, 8, 109, 290–292]. В обоих этих случаях возможен косвенный контроль их содержания в воде. Следует заметить, что ПДК ионов серебра и меди в питьевой воде достаточно жесткие, а требования к воде, сбрасываемой в рыбохозяйственные водоемы, еще выше.

К химическим способам обеззараживания питьевой воды относятся также широко применявшееся в начале 20 в. обеззараживание соединениями брома и йода, обладающими более выраженными бактерицидными свойствами, чем хлор, но требующими и более сложной технологии. В современной практике для обеззараживания питьевой воды йодированием предлагается использовать специальные иониты, насыщенные йодом. При пропускании через них воды йод постепенно вымывается из ионита, обеспечивая необходимую дозу в воде [222]. Такое решение приемлемо для малогабаритных индивидуальных установок. Существенным недостатком является изменение концентрации йода во время работы и отсутствие постоянного контроля его концентрации.

Применение активных углей [89] и катионитов, насыщенных серебром, например, С-100Ag или С-150Ag фирмы «Purolite» [198], преследует цели не «серебрения» воды, а предотвращения развития микроорганизмов

при прекращении движения воды. При остановках создаются идеальные условия для их размножения – большое количество органики, задержанное на поверхности частиц, их огромная площадь и повышенная температура. Наличие серебра в структуре этих частиц резко уменьшает вероятность обсеменения слоя загрузки. Серебросодержащие катиониты разработки ОАО НИИПМ – КУ-23СМ и КУ-23СП – содержат в себе значительно большее количество серебра и предназначены для обеззараживания воды в установках небольшой производительности [278, 279].

Из физических способов обеззараживания питьевой воды наибольшее распространение получило обеззараживание ультрафиолетовыми лучами, бактерицидные свойства которых обусловлены действием на клеточный обмен и особенно на ферментные системы бактериальной клетки. Ультрафиолетовые лучи уничтожают не только вегетативные, но и споровые формы бактерий, и не изменяют органолептических свойств воды. Важно отметить, что поскольку при УФ-облучении не образуются токсичные продукты, то не существует верхнего порога дозы. Увеличением дозы УФ-излучения почти всегда можно добиться желаемого уровня обеззараживания.

Основным недостатком метода является полное отсутствие последствия.

Организация процесса УФ-обеззараживания требует больших капитальных вложений, чем хлорирование, но меньших, чем озонирование. Более низкие эксплуатационные расходы делают УФ-обеззараживание и хлорирование сопоставимыми в экономическом плане. Расход электроэнергии незначителен, а стоимость ежегодной замены ламп составляет не более 10% от цены установки. Для индивидуального водоснабжения УФ-установки являются наиболее привлекательными.

Фактором, снижающим эффективность работы установок УФ-обеззараживания при длительной эксплуатации, является загрязнение кварцевых чехлов ламп отложениями органического и минерального состава. Крупные установки снабжаются автоматической системой очистки, осуществляющей промывку путем циркуляции через установку воды с добавлением пищевых кислот. В остальных случаях применяется механическая очистка.

Обеззараживание питьевой воды ультразвуком основано на способности его вызывать т. н. кавитацию – образование пустот, создающих большую разность давления, что ведет к разрыву клеточной оболочки и гибели бактериальной клетки. Бактерицидное действие ультразвука разной частоты весьма значительно и зависит от интенсивности звуковых колебаний.

Из физических способов индивидуального обеззараживания воды наиболее распространенным и надежным является кипячение, при котором, кроме уничтожения бактерий, вирусов, бактериофагов, антибиоти-

ков и др. биологических объектов, часто содержащихся в открытых водосточниках, удаляются растворенные в воде газы и уменьшается жесткость воды. Вкусовые качества воды при кипячении меняются мало.

Во многих случаях наиболее эффективным оказывается комплексное применение реагентных и безреагентных методов обеззараживания воды. Сочетание УФ-обеззараживания с последующим хлорированием малыми дозами обеспечивает как высочайшую степень очистки, так и отсутствие вторичного биогазирования воды. Так, обработкой воды бассейнов УФ-облучением в сочетании с хлорированием достигается не только высокая степень обеззараживания, снижение пороговой концентрации хлора в воде, но и, как следствие, существенная экономия средств на расходе хлора и улучшение обстановки в самом бассейне.

Аналогично распространяется использование озонирования, при котором уничтожается микрофлора и часть органических загрязнений, с последующим щадящим хлорированием, обеспечивающим отсутствие вторичного биогазирования воды. При этом резко сокращается образование токсичных хлорорганических веществ.

Поскольку все микроорганизмы характеризуются определенными размерами, показанными на рис. 1.3, пропуская воду через фильтрующую перегородку с размерами пор меньшими, чем микроорганизмы, можно полностью очистить от них воду. Так, фильтрующие элементы, имеющие размер пор менее 1 микрона, согласно действующим ТИ 10-5031536-73-10 на безалкогольную продукцию, считаются обеспложивающими, т. е. стерилизующими. Хотя на рисунке 1.3 видно, что удаляются только бактерии, но не вирусы. Для более «тонких» процессов, когда недопустимо присутствие любых микроорганизмов, например, в микроэлектронике, применяют фильтры с порами размером не более 0,1–0,2 мкм.

Достаточно новыми способами обеззараживания воды являются электрохимический и электроимпульсный [247, 248, 280–284, 293, 294]. Серийно производятся установки «Изумруд», «Сапфир», «Аквамин» и т. п. [247, 248, 280]. Их работа основана на пропускании воды через электрохимический диафрагменный реактор, разделенный ультрафильтрационной металлокерамической мембраной на катодную и анодную область. При подаче постоянного тока в катодной и анодной камерах происходит образование щелочного и кислого растворов, электролитическое образование активного хлора. В этих средах гибнут практически все микроорганизмы и происходит частичное разрушение органических загрязнений. Конструкция проточного электрохимического элемента хорошо отработана, и набором из различного числа таких элементов получают установки заданной производительности. Кроме того, их используют для получения дезинфицирующих растворов – католита и анолита, применяемых в медицинской практике. Что касается заявлений

разработчиков об изменении структуры воды и ее чудодейственных свойствах, оставим это без комментариев.

При электроимпульсном воздействии производится электрический разряд в воде – электрогидравлический удар, т. н. эффект Л. А. Юткина. При разряде возникает ударная волна сверхвысокого давления, световое излучение и образуется озон. Эти факторы губительно действуют на биологические объекты [293, 294].

### 3.8. Удаление органических загрязнений

Органические вещества присутствуют в воде в виде природных и техногенных соединений.

К природным относятся гуминовые и фульвокислоты и их соединения, в том числе их комплексы с железом.

Техногенные образуются в результате действия человека. В их числе продукты, образующиеся при обработке воды активным хлором, включая наиболее токсичные и канцерогенные – диоксины.

Органические загрязнения имеют различные размеры и молекулярную массу. Спектр распределения органических загрязнений по размерам представлен на рисунке 1.3.

Органические загрязнения могут быть удалены из воды двумя методами [1–18, 79–81, 104–114, 162–164, 192–201, 223–226]:

- разрушением (окислением) до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ;
- извлечением.

Разрушение производится сильными окислителями, такими как хлор, кислород, озон, а также жестким ультрафиолетом.

При дозировке в воду перманганата калия и ее фильтрации через каталитический материал Greensand эффективно удаляются многие органические соединения. Требуется подбор таких доз перманганата, при которых окисляются органические соединения, железо и марганец, но отсутствует проскок перманганата в очищенную воду.

Извлечение органических веществ может быть осуществлено сорбцией, коагуляцией и мембранными методами.

При сорбционном извлечении молекулы органических веществ сорбируются на поверхности специально подготовленного сорбента, в качестве которого наибольшее распространение имеют активные угли различного типа, или поглощаются в объеме сорбента-органопоглотителя «скавенжера». В качестве последнего используются слабоосновные аниониты с пористой структурой или гелевого типа с акриловой матрицей.

Угольный фильтр, неграмотно называемый некоторыми карбоновым, может быть установлен после механического или катионитного. Использование прочного гранулированного активного угля, например, АГ-3, допускающего частые взрыхления, позволяет совместить удале-

ние органических веществ с механической фильтрацией. При этом емкость угля может снизиться из-за забивания его пор частицами взвесей. Поскольку в любом случае уголь требует периодической замены при исчерпании сорбционной емкости, в ряде случаев выгоднее поставить один фильтр с углем и чаще его заменять, чем устанавливать дополнительный механический фильтр. Ресурс работы угля зависит от параметров воды и типа использованного угля и определяется при практических испытаниях.

Уголь требует периодической замены. Поэтому фильтры должны быть снабжены специальными штуцерами для загрузки и выгрузки угля.

Поскольку при коагуляции механизм извлечения органики состоит в ее сорбции на образующихся хлопьях, имеющих огромную поверхность, этот метод также может быть отнесен к сорбционному извлечению.

При пропускании воды через полупроницаемую мембрану на ней задерживаются органические вещества, имеющие молекулярную массу:

- при ультрафильтрации – более 10000;
- при нанофильтрации – более 200;
- при обратном осмосе – практически любую.

Как правило, очистку природной воды от органических загрязнений производят ее обработкой активированным углем. В тех случаях, когда вода имеет только сезонную, периодическую, повышенную концентрацию органики, обычно применяют «углевание», т. е. обработку пылевидным углем, вводимым при коагуляции или фильтрации. В других случаях очистку производят в напорных фильтрах со стационарным слоем угля. Применимость отечественных углей для этих процессов показана в таблице 2.21.

Наиболее современным способом удаления органики является ультрафильтрационный. Он позволяет одновременно дезинфицировать воду, удалить все взвеси и многие органические вещества (дезодорировать и обесцветить воду). Разработаны соответствующие типы мембран и мембранных установок производительностью сотни кубометров в час (раздел 2.1.3.).

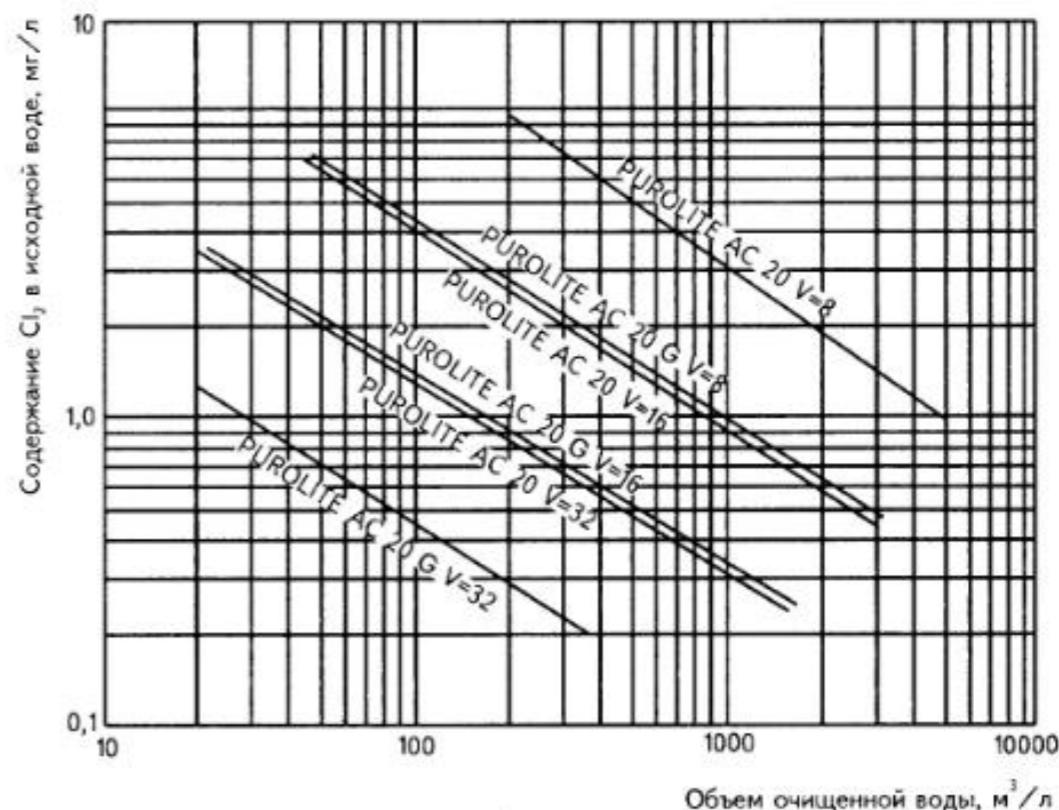
### 3.9. Дехлорирование

Использование хлорированной водопроводной воды вызывает неприятные ощущения у многих людей и совершенно недопустимо для многих технологических процессов. Так, в пищевой промышленности возможно изменение цвета и резкое ухудшение вкуса продуктов, в производстве электронных компонентов возможно полное нарушение технологического процесса. В процессах водоподготовки там, где применяются установки обратного осмоса с современными мембранами, содержание активного хлора ограничено 0,1 мг/л.

Однако во многих таких производствах для дезинфекции воды ее обрабатывают большими дозами хлора, который затем необходимо извлечь.

Процесс удаления избыточного активного хлора называется дехлорированием и обязателен во всех рассмотренных выше случаях.

**Дехлорирование** [7–13, 198] обычно осуществляется при пропускании воды через активированный уголь. На загрузке происходит восстановление активного (растворенного) хлора до аниона  $Cl^-$ . Ресурс работы угля значительно выше, чем при сорбции органики, и может составлять несколько лет. Продолжительность работы зависит от концентрации хлора в воде и скорости фильтрования. На рисунке 3.18 показана зависимость количества воды, в  $m^3$ , которое можно пропустить через 1 литр угля в зависимости от условий работы [198].



**Рис. 3.18.** Количество воды в  $m^3$ , которое можно пропустить через 1 литр угля AC-20, в зависимости от содержания свободного хлора и объемной скорости фильтрования  $V$  в  $m^3$  воды на  $m^3$  сорбента

При очистке природной воды на активном угле происходит, кроме того, окисление  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$ , а также задерживаются взвеси и коллоидные частицы  $Fe^{3+}$ . При загрязнении фильтров они регенерируются путем обратной промывки исходной водой. На фильтрах устанавливаются блоки управления регенерацией по времени.

Дехлорирование производится либо в отдельном аппарате, либо совмещается с другими операциями (механической фильтрации, удаления органики).

### 3.10. Удаление нитратов

В воде поверхностных источников, реже в подземных, присутствуют соединения азота в виде нитратов и нитритов. В настоящее время происходит постоянный рост их концентрации, связанный прежде всего с широким использованием нитратных удобрений, избыток которых с грунтовыми водами поступает в реки и озера. Установленные нормы на содержание нитратов составляют  $\text{NO}_3^- \leq 45$  мг/л, нитритов –  $\text{NO}_2^- \leq 3$  мг/л (таблица 1.2).

Существуют два пути удаления нитратов и нитритов – это обратный осмос и ионный обмен. В первом случае должно производиться обессоливание воды до такой степени, при которой концентрация нитратов будет соответствовать норме [295]. Однако при обратном осмосе удаляются все соли с малой селективностью и в результате получается обессоленная вода. Вопрос об ее полезности для организма и вкусовых качествах является дискуссионным. Стоимость такой обработки достаточно высока. При высоком содержании нитратов вполне возможно использовать малогабаритные установки обратного осмоса для приготовления воды только для питьевых нужд. Все остальные потребители (стирка, мытье и т. п.) вполне могут использовать водопроводную воду.

Сильноосновный анионит в Cl-форме может, согласно ряду селективности (раздел 2.3.1), сорбировать ионы  $\text{NO}_3^-$  и обменивать их на ионы  $\text{Cl}^-$ . На анионите в Cl-форме сорбируются также и анионы  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Поэтому такой процесс может быть реализован, если суммарное содержание анионов сильных кислот  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{HCO}_3^-$  не превышает ПДК по ионам  $\text{Cl}^-$ .

Поскольку в ряду селективности стандартных сильноосновных анионитов типа АВ-17-8 анион  $\text{NO}_3^-$  стоит левее  $\text{SO}_4^{2-}$ , т. е. сродство анионита к последнему выше, то он может вытеснять анион  $\text{NO}_3^-$  из анионита. Поэтому при наличии в воде значительного количества сульфатов возможен случай, показанный на рисунке 3.19. Видно, что после насыщения смолы по нитрат-ионам, сульфат-ионы, имеющие большее сродство к аниониту, вытесняют нитрат-ионы в фильтрат в количестве большем, чем их исходное содержание. Соответственно необходим очень жесткий контроль работы фильтров. Кроме того, поскольку сорбируются и нитрат-, и сульфат-ионы, емкость такого анионита по нитратам оказывается незначительной [218].

Специально для процессов извлечения нитратов всеми ведущими производителями ионитов разработаны специальные аниониты, селективность которых к нитратам выше, чем к сульфатам. Например, анионит А-520Е фирмы Purolite, ИМАК НР555 фирмы Rohm & Haas. Ряд селективности для таких анионитов выглядит следующим образом:

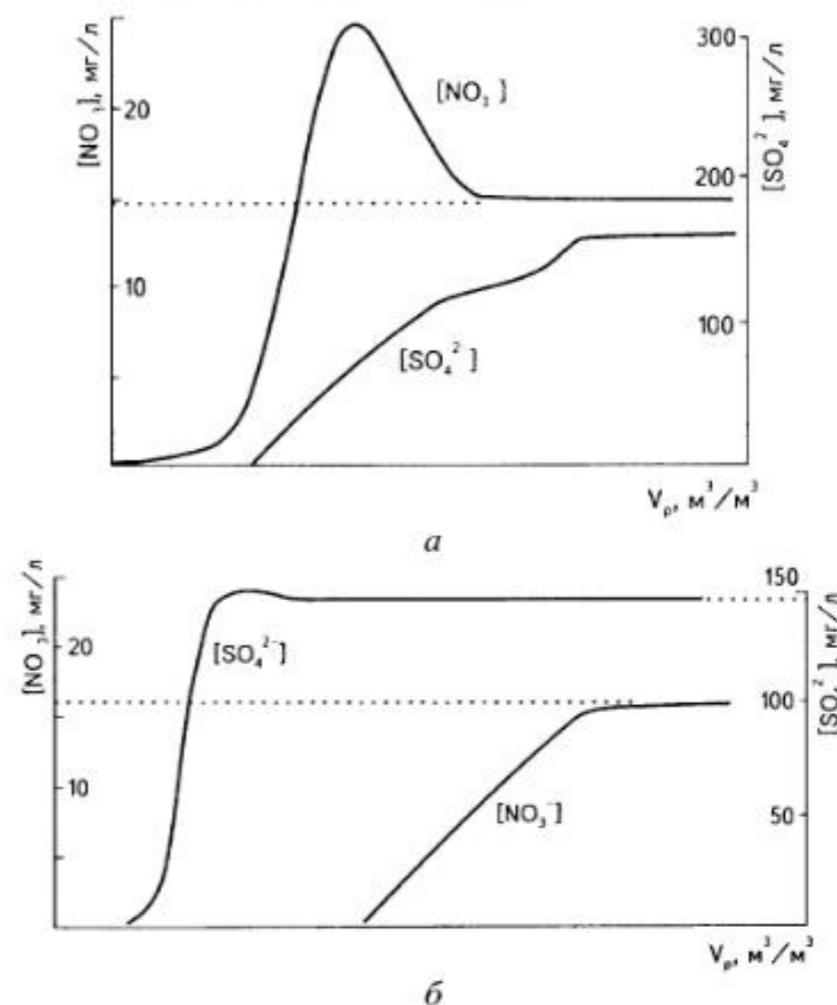
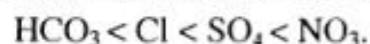


Рис. 3.19. Выходные кривые сорбции для обычных (а) и селективных к нитрат-ионам (б) анионитов

Выходные кривые сорбции для обычных и селективных анионитов показаны на рисунке 3.19. Видно, что обменная емкость селективных анионитов по нитратам в присутствии сульфатов существенно выше. К сожалению, стоимость этих смол также в несколько раз больше. В работах автора книги было показано, что при содержании нитратов до 200 мг/л и сульфатов 50–100 мг/л, анионит АВ-17-8 не уступал по качеству очистки, эффективности регенерации и обменной емкости специальному аниониту А-520Е фирмы Purolite.

При регенерации анионита солью  $\text{NaCl}$  возможно вторичное использование соли в виде регенерата, содержащего смесь  $\text{NaCl} + \text{NaNO}_3 + \text{Na}_2\text{SO}_4$ , для регенерации катионита. В этом случае удаление нитратов сочетается с умягчением и снижением щелочности, как это описано в разделе 3.4.2.

Нитраты, содержащиеся в солевых регенератах, могут быть биологически разложены. После этого регенераты либо сбрасываются, либо доукрепляются солью и возвращаются в процесс.

## 4. Построение аппаратурно-технологических схем очистки воды для бытовых и промышленных целей. Примеры использования

### 4.1. Очистка воды в коттеджах

Основной толчок внедрению современных технологий водоподготовки в России дал быстро развивающийся рынок бытовых (коттеджных) установок. В бытовых условиях могут использоваться только высоконадежные и высокоэффективные аппараты, требующие минимального обслуживания. Отсутствие в СССР и России производства такого оборудования и расходных материалов и в то же время их огромный ассортимент за рубежом привели к созданию многочисленных фирм, закупающих импортное оборудование и осуществляющих его монтаж и наладку. Ряд отечественных организаций производит оборудование по своим разработкам, однако при этом широко используют импортные комплектующие.

Поскольку состав воды в каждом месте индивидуален, то и схема очистки должна подбираться индивидуально. Для очистки любой воды до требований СанПиН 2.1.4.10749-01 необходимо удалить все загрязнения, концентрация которых превышает нормы. В общем случае в состав установки должны включаться операции:

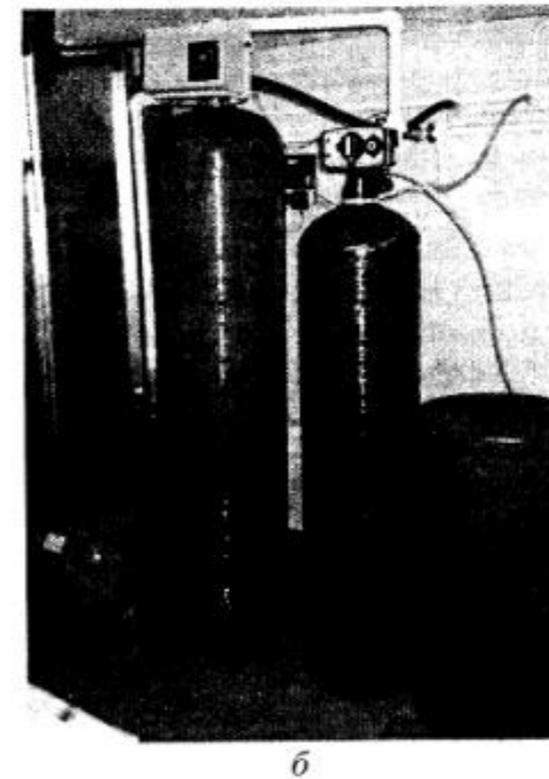
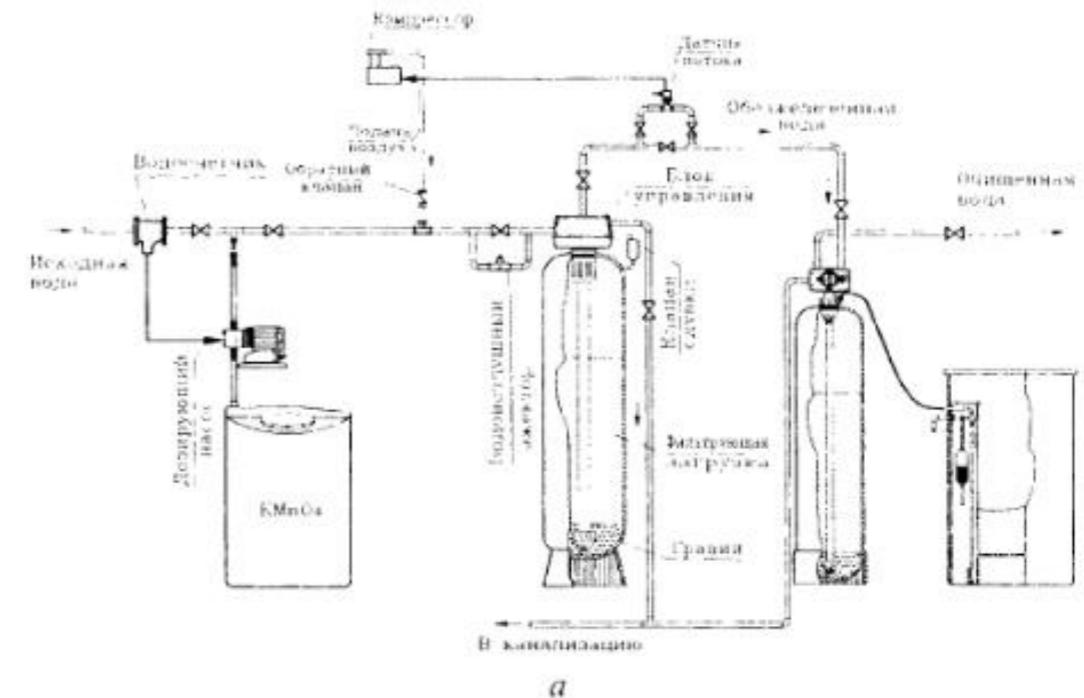
- грубая предварительная фильтрация;
- очистка от взвесей;
- обезжелезивание;
- удаление органических загрязнений;
- умягчение;
- обеззараживание,

а в ряде случаев и опреснение.

В зависимости от состава воды в конкретном месте, выбираются операции, необходимые для ее очистки. Причем некоторые операции могут быть совмещены, как это описывалось выше.

Существует принципиальная минимальная схема очистки воды в коттедже (рис. 4.1). Она включает в себя узел обезжелезивания и умягчения. Такая схема пригодна для очистки подземных вод, в которых отсутствуют биологические и органические загрязнения. В первом фильтре производится механическая фильтрация и обезжелезивание, на схеме изображены 3 варианта проведения обезжелезивания. В зависимости от количества железа и марганца в исходной воде используется либо очистка на загрузке типа «Virm» с вводом дополнительного воздуха эжектором или компрессором, включающимся по сигналу от датчика

протока, или типа «Greensand» с регенерацией его раствором перманганата или с системой его пропорционального дозирования. В последнем случае возможно удаление сероводорода и обеззараживание воды. Достоинства и недостатки указанных вариантов рассмотрены в разделе 3.3.



**Рис. 4.1.** Принципиальная минимальная схема очистки воды в коттедже (а) и вид установки (б).

На схеме представлены все варианты ввода окислителя (воздуха или перманганата) в воду

При работе фильтра на очистке вода с введенным воздухом поступает в блок управления (головку) и из нее в верхнюю часть фильтра, вводится внутрь через распределительную систему, фильтруется сверху вниз через слой загрузки, очищается при этом от железа и взвешенных частиц и через расположенный внизу фильтра дренаж, помещенный в слой гравия, выводится из фильтра в блок управления.

Не растворившийся в воде воздух, который собирается в верхней части фильтра, выводится из него через автоматический воздухоотделитель (клапан сдувки).

При забивании загрузки фильтра загрязнениями увеличивается перепад давления и падает производительность. В период проведения пуско-наладочных работ в блоке управления устанавливается периодичность и время (обычно ночью), в которое фильтр автоматически переключается в режим регенерации загрузки. Регенерация проводится путем подачи воды с большой скоростью снизу вверх и сбросом загрязненных вод в канализацию. Скорость устанавливается выше скорости псевдоожижения загрузки такой, при которой она расширяется на 30–50%, что позволяет полностью удалить из нее задержанные загрязнения.

Очищенная от взвесей и железа вода умягчается на катионите в Na-форме. Конструкция и состав этого фильтра практически одинаковы у всех производителей. Отличия состоят в типе блока управления и узлах солерастворителя.

Вода подается в блок управления установки умягчения. В блоке расположены: счетчик расхода очищенной воды; программно-временное устройство, обеспечивающее проведение регенерации катионита, его отмывки и взрыхления; многоходовой клапан с электроприводом.

При работе установки умягчения на очистке, вода из блока управления поступает в корпус фильтра, фильтруется сверху вниз через слой катионита в Na-форме, очищается от солей жесткости, катионов тяжелых металлов и через расположенный внизу корпуса фильтра дренаж выводится из него.

После исчерпания емкости катионита качество умягчения значительно ухудшается. При проведении пуско-наладочных работ в блоке управления устанавливается объем раствора, после обработки которого фильтр автоматически переключается в режим регенерации катионита.

Регенерация катионита включает в себя следующие технологические операции:

- взрыхление с подачей воды снизу вверх для удаления задержанных взвесей и измельченных частиц катионита;
- пропуск регенерационного раствора 7–10% NaCl, полученного в эжекторе путем подсоса из бака-солерастворителя концентрированного 26% раствора;

- медленная отмывка сверху вниз;
- быстрая отмывка сверху вниз;
- подача в бак-растворитель заданного объема умягченной воды.

Для бытовых целей в блоке управления обычно предусматривается режим проведения т. н. отложенной регенерации, когда она производится после сигнала счетчика об исчерпании емкости фильтра в те же сутки ночью, когда расход воды отсутствует. Используется также вариант с периодической регенерацией через определенное число суток вне зависимости от расхода воды. Преимуществом такого варианта является меньшая на 5–7% стоимость, снижение возможности обсеменения загрузки при длительном отсутствии жильцов, а недостатки состоят в повышенном расходе соли и нестабильном качестве умягчения воды.

Важным моментом в расчете коттеджной установки является установление размеров фильтров, которые и определяют ее стоимость. Основой для расчета должно быть максимальное потребление воды, когда открыто наибольшее, но реальное, количество потребителей. Возникает вроде бы парадоксальная ситуация, когда для дома с суточным водопотреблением менее 1 м<sup>3</sup> необходима установка производительностью 1–3 м<sup>3</sup>/ч. Невыполнение этого условия приводит при большом расходе воды к резкому ухудшению ее качества и уменьшению напора в системе. Критическим элементом в такой схеме является фильтр обезжелезивания. Его удельная производительность не должна превышать 10–12 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч (рабочая скорость 10–12 м/ч) вне зависимости от применяемой загрузки и вводимого окислителя (см. приложения 7, 8). Удельная производительность фильтра умягчения может быть вдвое выше, и качество воды не так сильно зависит от ее скорости. К сожалению, многие производители с целью снижения стоимости или повышения рентабельности завышают допустимые рабочие скорости, например, рассчитывая фильтры при работе с «Greensand» и перманганатом на скорость до 30 м/ч.

Для коттеджей очень важно правильно выбрать метод обезжелезивания. В разделе 3.3 и в приложениях 8, 9 даны соответствующие рекомендации. По нашему мнению, применение систем с регенерацией перманганатом, которые выводят из строя биосептики, допустимо только в случаях, когда концентрации железа и марганца очень велики и их не удается окислить воздухом, либо наряду с ними в воде присутствует сероводород. Другим эффективным путем удаления сероводорода и окисления железа является интенсивная аэрация воды при ее подаче в промежуточную емкость до установки очистки (рис. 3.2, б). Такой способ целесообразен и при нестабильной подаче воды из централизованного водопровода, поскольку позволяет иметь ее запас, а давление поддерживать собственным насосом.

Снизить производительность установки и ее стоимость можно, расположив буферную емкость после установки очистки. Емкость может быть герметичной, типа гидробака, либо наливной с дополнительным насосом. В последнем случае для предотвращения попадания в воду загрязнений, на сдувке емкости необходимо установить микрофильтр. После такой емкости необходимо установить систему обеззараживания.

#### 4.2. Подготовка воды для ликероводочных производств

Как бы тривиально это ни звучало, но поскольку водка на 60% состоит из воды, ее качественные показатели в очень большой мере определяются составом воды.

Следует отметить, что никакой особой технологии водоподготовки для ликероводочной промышленности не существует. Все применяемые технологические операции свойственны для любых других установок водоподготовки. Аналогичны и аппаратно-технологические решения. Требования по составу воды много ниже, чем для тепловых и атомных станций, электронных и медицинских производств.

Основным отличием водоподготовки для ликероводочной промышленности, как и для любой пищевой, является обязательное требование использования оборудования, материалов и реагентов, сертифицированных для применения в пищевых процессах.

Единственным специфическим требованием, предъявляемым к воде для водки, впрочем, как и для безалкогольных напитков, являются ее вкусовые характеристики. Образцы вод, имеющих разный химический состав в пределах, заданных соответствующей ТИ 10-04-03-09-88, имеют различный вкус. Корректируя состав, можно добиться определенного вкуса воды и сделанной из нее водки. Не потеряла актуальности идея об обессоливании воды с последующим введением в нее определенных солей, обеспечивающих наилучшие дегустационные показатели водки при ее высокой стабильности. Такой подход широко распространен в пивоварении. Однако такой путь и наиболее дорог.

В большинстве случаев на предприятиях используется вода из городского водопровода или собственных артезианских скважин, состав которой путем соответствующей водоподготовки – т. н. «исправления» воды – доводится до заданного технологической инструкцией ТИ 10-04-03-09-88 по лимитирующим компонентам (жесткость, железо, органика и т.п.).

Схема такой водоподготовки зависит от состава исходной воды и требований производителя. Поэтому технологическая схема и состав оборудования таких установок может существенно различаться [19, 21, 23–28, 63, 116, 117, 123, 125–128, 133]. Рассмотрим два примера установок водоподготовки для «хорошей» и «плохой» исходной воды при

обеспечении высокого качества очищенной «исправленной» воды [23, 24]. В таблице 4.1 показан усредненный состав таких вод.

#### 4.1. Состав воды в гг. Черноголовке и Электрогорске, требования ТИ 10-04-03-09-88 и СанПиН 2.1.4.10749-01

Компонент	Черноголовка		Электрогорск	ТИ 10-04-03-09-88 и СанПиН 2.1.4.10749-01
	Гор. водопровод	Скважина 170 м	Гор. водопровод	
Цвет, град.	0	5	22	0
Запах	Отс.	Отс.	Затхлый	Отс.
Мутность, мг/л	н/о	0,37	1,5	1,5
pH	7,6	7,6	6,9–7,4	<7,8
Солесодержание (сухой остаток), мг/л	210	250	260–510	<500
Жесткость общая, мг-экв/л	3,9	4,6	4,4–6,8	<0,2
Щелочность, мг-экв/л	4,0	4,6	3,1–4,8	<4,0
Железо, мг/л	0,3	0,1	0,7–1,4	<0,15
Гидрокарбонаты, мг/л	225	270	260	244
Окисляемость, мг О <sub>2</sub> /л	2,1	0,7	3,2–7,5	< 6,0*

\* в зависимости от вида продукции

В г. Черноголовка водопроводная вода по всем показателям, кроме жесткости, удовлетворяет условиям производства водки и безалкогольных напитков. Особенно качественная вода добывается из артезианской скважины глубиной 170 м. Состав воды типично гидрокарбонатный.

Вода в г. Электрогорске даже после очистки на городских и заводских системах водоснабжения содержит значительные количества органических соединений и железа. Это обусловлено особенностями гидрогеологического строения подземных горизонтов, а также наличием большого числа торфяников в этом районе. Последнее при нарушении герметичности обсадных труб скважины приводит к очень сильному загрязнению воды органическими веществами.

В цехах предприятий уже действовали установки водоподготовки нескольких типов, поэтому при создании новых установок имелась возможность сравнения их параметров.

Поскольку на этих производствах качеству продукции уделяется большое внимание, то у заказчиков были повышенные требования к качеству воды, как по составу, так и по его стабильности, а также по надежности работы оборудования.

Следует отметить, что создание этих установок производилось в очень короткие сроки (от 2 до 4 недель) на ограниченных производственных площадях при требовании немедленного, после пуска, получе-

ния высококачественной воды. Это заставило использовать в некоторых узлах не оптимальные решения.

#### 4.2.1. ОСТ АЛКО

При разработке установки для ООО «ОСТ АЛКО» (ныне ООО «ЧЗАП Ост-Алко») было необходимо обеспечить стабильную минимальную жесткость и содержание железа [23]. Поскольку содержание железа в исходной воде незначительно, для упрощения установки и в связи с ограниченностью в тот момент производственных площадей, было решено использовать только ионообменное умягчение с дополнительной микрофильтрацией через патронные фильтрующие элементы с размером пор 50 мкм. Отсутствие в воде активного хлора позволило отказаться от использования угольного фильтра-дехлоратора. Однако наличие корпусов микрофильтров типа Big Blue позволяет, при необходимости, установить в нем угольный картридж.

Умягчение воды производится на сильнокислотном катионите типа Purolite C-100E пищевого качества, являющемся аналогом КУ-2-8чс в Na-форме. Он позволяет при линейных скоростях раствора до 20 м/ч, а объемных до 40 V/ч умягчать воду с исходной жесткостью 5–10 до 0,05–0,1 мг-экв/л. Регенерация катионита производится поваренной солью.

Расчет ионообменных фильтров производится, исходя из их производительности, жесткости очищаемой воды, принятой емкости ионита и удельной производительности. Для промышленных установок необходимо учитывать также режим их работы и суточную производительность с тем, чтобы продолжительность фильтроцикла обеспечивала бы не менее суточного объема очищенной воды. При постоянной работе фильтра требуемый объем ионита может оказаться существенно больше рассчитанного, исходя из часовой и удельной производительности.

Схема установки приведена на рис. 4.2, а, а ее внешний вид на рис. 4.2, б.

Установка состоит из двух идентичных цепочек аппаратов. Каждая из них включает в себя: грязевик 2; установку умягчения воды 3, 4, 5; микрофильтр 7; контрольный манометр 6; электромагнитный клапан 9; пробоотборник 10; запорную арматуру; трубопроводы.

Вода из водопровода через запорный шаровый кран поступает в установку. Для удаления растворенного в воде воздуха на трубопроводе подачи воды установлен воздухоотделитель. Подача воды на каждую нитку установки производится через шаровые краны. После крана вода поступает в грязевик 2, где из нее извлекаются крупные частицы (песок, окалина). После этого вода подается в блок управления 3 установки умягчения. В блоке 3 расположены: счетчик расхода очищенной воды; программно-временное устройство, обеспечивающее проведение регенерации катионита, его отмывки и взрыхления; многоходовой клапан с электроприводом.

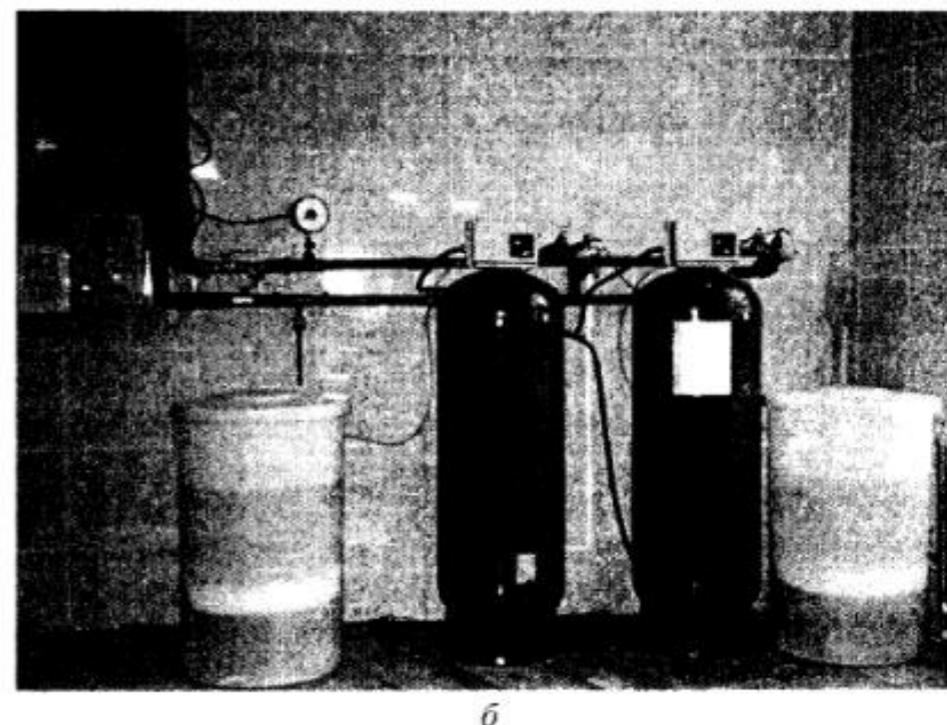
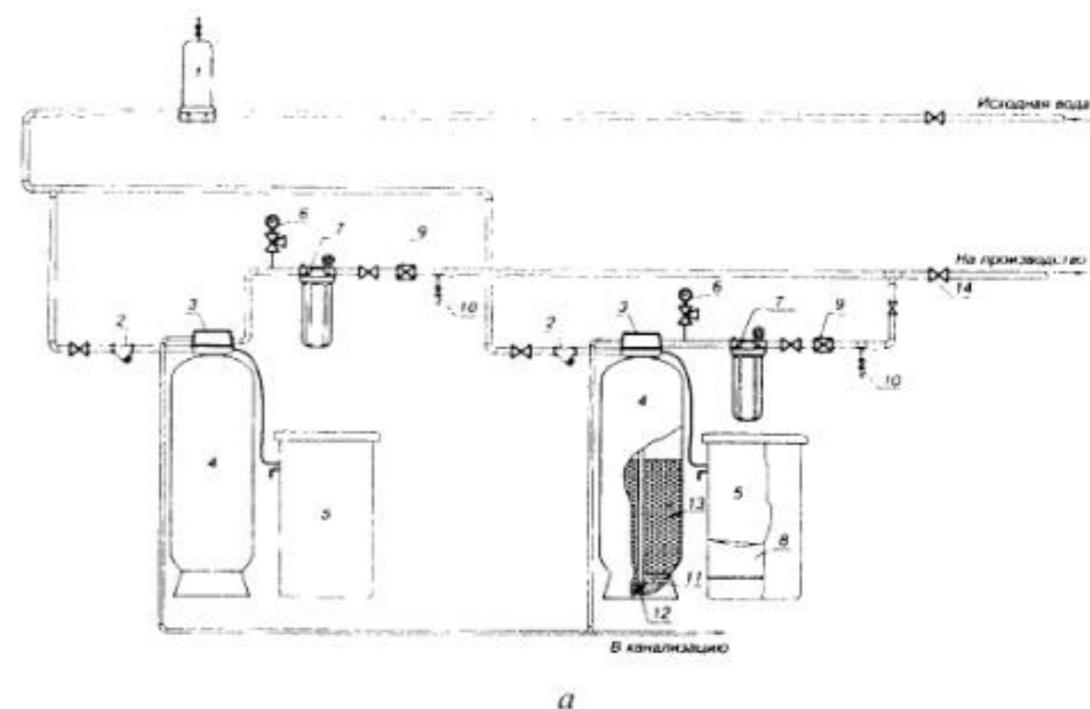


Рис. 4.2. Схема установки водоподготовки на ООО «ОСТ-Алко» (а), и ее внешний вид (б):

1 – воздухоотделитель; 2 – грязевик; 3 – блок управления; 4 – корпус фильтра; 5 – солерастворитель; 6 – манометр; 7 – микрофильтр; 8 – соль; 9 – электромагнитный клапан; 10 – пробоотборник; 11 – слой гравия; 12 – дренаж; 13 – катионит; 14 – шаровый кран

При работе установки умягчения на очистке вода из блока 3 поступает в корпус фильтра 4, фильтруется сверху вниз через слой катионита в Na-форме 13, очищается от солей жесткости, катионов тяжелых металлов и взвешенных частиц и через расположенный внизу корпуса фильтра дренаж 12 выводится из него. Умягченная вода поступает в микрофильтр 7, перед которым установлен манометр 6 для контроля загрязненности микрофильтра и определения момента для замены фильтрующего элемента.

Очищенная вода через запорный шаровой кран и нормально открытый электромагнитный клапан 9 поступает в коллектор и из него через общий запорный шаровой кран 14 – в цеховые сборники воды.

Перед коллектором установлен пробоотборник 10 для отбора проб воды с любой из ниток установки.

После исчерпания емкости катионита проводится его регенерация, как описано выше.

Технические характеристики установки:

Производительность составляет, м<sup>3</sup>/ч:

– на номинальном режиме – 10;

– на форсированном режиме – 16;

– при регенерации одной из ионообменных установок – 8.

Режим работы – автоматический с включением регенерации по счетчику расхода воды.

Марка фильтров – SF-55M.

Производительность номинальная фильтра – 5,5 м<sup>3</sup>/л.

Производительность максимальная фильтра – 8,0 м<sup>3</sup>/л.

Скорость раствора при номинальном режиме линейная – 25 м/ч.

Количество очищенной воды до регенерации, м<sup>3</sup> – 2×55.

Потери напора – 0,6–1,0 атм.

Рабочее давление – до 8 кг/см<sup>2</sup>.

Габариты, мм:

	диаметр	высота
– фильтра	560	1780
– бака-солерастворителя	710	1060

Занимаемая площадь – 3×1,5 м вдоль стены.

Объем катионита, л – 2×200.

Масса в сборе, кг – 720.

Рабочая обменная емкость при дозе соли на регенерацию 80–150 г/л смолы, г-экв – 180–220.

Напряжение электрической сети – 220±10% В, 50 Гц.

Давление воды на входе в установку:

– не менее 2,5 атм.

– не более 8,0 атм.

Для сравнения, существовавшая ранее установка (2 фильтра диаметром 1500 и высотой 2000 мм и общий солерастворитель объемом около 4 м<sup>3</sup>) с ручным управлением, занимала помещение площадью около 36 м<sup>2</sup>, в углу которого и разместилась наша установка. Эта установка не обеспечивала заданной жесткости воды и ее стабильности, требовала больших затрат ручного труда, особенно для загрузки и растворения соли.

Новая установка первой очереди пущена в эксплуатацию в марте 1997 г. Интенсивность работы была такова, что фильтры регенерировались чаще, чем раз в сутки. Качество очищенной воды ни разу не выходило за установленные на заводе пределы (жесткость до 0,1 мг-экв/л). Стабильно жесткость поддерживается на уровне предела определения – 0,05 мг-экв/л. За первые прошедшие 4 года качество очистки не изменилось. Уменьшился объем воды, очищенной за один фильтроцикл. Если в начале эксплуатации он составлял 55–60 м<sup>3</sup>, то в конце 2000 г. сократился до 45–50 м<sup>3</sup>, т. е. на 15–20%. Это связано как с механическим и осмотическим износом (измельчением) ионита с последующим его выносом из фильтра и уменьшением рабочего объема ионита, так и с некоторым отравлением его железом. После замены катионита в конце 2000 г. длительность фильтроцикла восстановилась.

Обслуживание установки свелось к засыпке соли в солерастворитель и периодическому контролю качества воды, особенно в конце фильтроцикла. По результатам анализов персонал самостоятельно регулирует продолжительность фильтроцикла.

Эксплуатация установки показала, что загрязнения микрофильтров не происходит, а попадание воздуха в подающей водопровод было ликвидировано. Поэтому при монтаже второй установки эти элементы были исключены (рис. 4.2, б).

Высокое и стабильное качество воды в городском водопроводе г. Черноголовки позволило на первом этапе не устанавливать систему обеззараживания воды. Практика первых лет эксплуатации установок подтверждала правильность такого решения. Однако при аварии на водопроводе возникло обсеменение трубопроводов и загрузки фильтров. Длительные остановки в работе в этот период усугубили ситуацию. Наличие биозагрязнений в воде могло сказаться на качестве продукта, о котором очень заботятся на данном производстве. Поэтому были приняты технические решения и разработаны технологические приемы и рекомендации, позволившие решить проблему. В них вошли: установка дополнительных микрофильтров, введение в слой катионита специального стерилизующего средства, изменение циклограммы работы фильтра при длительных остановках, а также введение УФ обеззараживания очищенной воды.

Некоторые проблемы возникали с узлом приготовления насыщенного раствора соли. В 1997 г. гранулированная соль была еще дорога и малодоступна. Среди производителей идея замены дешевой отечественной соли на импортную таблетированную не вызвала энтузиазма. Следует отметить, что вклад стоимости водоподготовки в общую себестоимость продукции составляет доли процента, а стоимости соли еще меньше. Однако при больших масштабах производства эти стоимости составляют внушительные цифры. При использовании обычной соли возникают три основные проблемы в работе солерастворителя: низкая концентрация соли в растворе, наличие значительного объема грязи, забивание солью трубки засоса солевого раствора в головку управления.

При использовании обычной соли необходимо применять солерастворители с ложным днищем. Это несколько улучшает растворение соли, правда и затрудняет отмывку солерастворителя от грязи. Для насыщения раствора применяются периодическое механическое перемешивание вручную вешлом, насосом или барботаж воздухом.

Крупная соль обычно сильно загрязнена глинистыми включениями, и они собираются в нижней части солерастворителя. Поэтому периодически возникает необходимость в очистке солерастворителя. Для этого после проведения регенерации головку управления отключают на фазе отмывки фильтра, не давая воде заполнить солерастворитель. Сняв опорную решетку, солерастворитель с помощью сифона отмывают от грязи.

Мелкая качественная соль, например, «Экстра», как ни странно, требует лучшего перемешивания и значительно чаще забивает трубку засоса солевого раствора. Последнее требует постоянного наблюдения за работой установок и ликвидируется путем промывки системы забора солевого раствора.

В настоящее время несколькими предприятиями выпускается отечественная гранулированная соль с разумной стоимостью, и ее применение для установок производительностью до 10–20 м<sup>3</sup>/ч оправдано во всех отношениях. Для установок большей единичной производительности проблема приготовления солевого раствора должна решаться на других принципах.

В дальнейшем для снижения солесодержания и щелочности воды была смонтирована установка обратного осмоса. Смешивая обессоленную и умягченную воду в заданном соотношении, можно получать необходимые вкусовые качества водки.

#### 4.2.2. ФЕРЕЙН

Низкое качество воды в г. Электрогорске (табл. 4.1) связано с содержанием значительных количеств органических соединений и железа. Поэтому схема водоподготовки требует введения операций по удалению этих загрязнений [24].

Существовавшая на ООО «Ферейн» установка не обеспечивала необходимого количества и качества воды. Она состояла из песочных и ионообменных фильтров диаметром 1500 мм, а также аналогичного угольного фильтра, каждый объемом 2 м<sup>3</sup>. Причем замену угля приходилось вести раз в две недели. В противном случае окисляемость оказывалась выше норм, принятых для качественных водок.

Полученные пробы воды, как оказалось, не представительные, а с качеством выше среднего, показали, что содержание железа не превышает 0,7–1,2 мг/л, а окисляемость 7–8 мг О<sub>2</sub>/л. Их обработка активным хлором в количестве до 5–9 мг/л давала практически полное разрушение органики и удаление железа до 0,1–0,15 мг/л, что полностью устраивало производство.

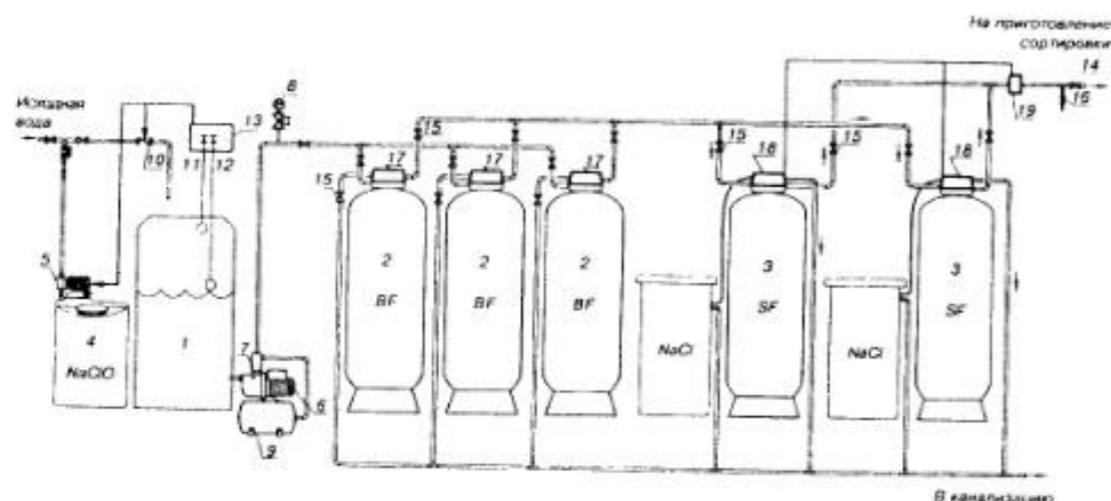
Для обеспечения заданного качества воды была разработана аппаратурно-технологическая схема, включающая очистку методами окисления, обезжелезивания, дехлорирования и сорбции, а также умягчения (натрий-катионирования). Окисление имеющихся в исходной воде органических загрязнений и двухвалентного железа производится активным хлором и его оксидами. Извлечение взвеси окислов железа и дехлорирование воды осуществляется на многослойной загрузке из активированного угля типа АГ-3 или АГ-5 и каталитического материала Vigm. Умягчение производится на сильноокислотном катионите Purolite C-100E, являющемся аналогом КУ-2-8чс.

НПО «Экран» активно пропагандирует электрохимические установки обработки воды, в том числе генераторы активного хлора и его оксидов типа «Аквадез», как более эффективные, чем раствор гипохлорита. Поэтому на первом этапе была принята схема с такой установкой.

Установка водоподготовки включает в себя (рис. 4.3):

- приемную емкость 1;
- блок фильтров обезжелезивания, дехлорирования 2;
- установку умягчения воды 3;
- установку «Аквадез» или расходную емкость с реагентом 4 и насосом 5;
- питающий насос 6 с системой автоматики: реле давления 7, гидробаком 9;
- контрольный манометр 8;
- систему стабилизации уровня воды в баке с электромагнитным клапаном 10, датчиками уровня 11, 12 и реле уровня 13;
- рабочие запорные шаровые краны 14;
- шаровые краны для отключения отдельных аппаратов 15;
- пробоотборник 16;
- головки управления фильтрами обезжелезивания-дехлорирования с последовательным выводом на регенерацию в заданное время 17;

- общий счетчик воды 19, включающий блоки 18 управления фильтров умягчения 3 на регенерацию, система «дуплекс»;
- трубопроводы.



а



б

**Рис. 4.3.** Установка водоподготовки АО «Ферейн». Схема (а), внешний вид (б):

1 – буферная емкость; 2 – механические фильтры; 3 – ионообменные фильтры; 4 – емкость с реагентом; 5 – насос-дозатор; 6, 7, 9 – насос с реле давления и гидробаком; 8 – манометр; 10 – электромагнитный клапан; 11–13 – реле уровня с датчиками; 14, 15 – краны; 16 – пробоотборник; 17, 18 – блоки управления; 19 – счетчик воды

Технические характеристики установки:

Производительность составляет, м<sup>3</sup>/ч:  
– на номинальном режиме – 10;

– на форсированном режиме – 12.

Площадь, занимаемая установкой, – 2,5×3,5 м<sup>2</sup>.

Технические характеристики блока обезжелезивания-дехлорирования:

марка фильтров – BF-25Г;

количество одновременно работающих фильтров – 3;

режим работы – автоматический с включением регенерации по таймеру;

производительность при регенерации одного фильтра – 8 м<sup>3</sup>/ч;

скорость раствора при номинальном режиме линейная – 12 м/ч;

потери напора – 0,6–1,0 атм;

рабочее давление – до 8 кг/см<sup>2</sup>;

габариты, мм.	диаметр	высота
– фильтра	560	1780

объем загрузки в одном фильтре, л – 3×200.

Технические характеристики блока ионообменной очистки:

марка – SF-75D-28;

режим работы – автоматический с включением регенерации по счетчику расхода воды и последовательной регенерацией фильтров;

производительность при регенерации одного фильтра – 8–10 м<sup>3</sup>/ч;

скорость раствора при номинальном режиме линейная – 25 м/ч;

габариты, мм.	диаметр	высота
– фильтра	610	2030
– бака-солеорастворителя	740	1110

объем катионита, л – 2×300;

рабочая обменная емкость при дозе соли на регенерацию 80–150 г/л смолы, г-экв – 2×(280 – 340).

Вода из водопровода через электромагнитный клапан 10 поступает в емкость 1. Уровень воды в емкости поддерживается автоматически включением и выключением клапана 10 с помощью реле уровня 13 по сигналу от датчиков уровня 11, 12. В эту же емкость подается вода, содержащая активный хлор и его оксиды, из установки «Аквадез» 4. Время выдерживания (контактирования) воды с оксидантами составляет не менее 20 минут.

В электрохимический генератор оксидантов подается умягченная вода и концентрированный раствор соли. Подача воды производится от фильтров умягчения. Раствор оксидантов вводится в трубопровод подачи исходной воды в емкость 1 с помощью насоса-дозатора 5.

Вода с окисленными органическими примесями и железом, содержащая избыточный активный хлор, подается насосом 6 на установку обезжелезивания-дехлорирования. Насос 6 включается автоматически от реле давления 7 при уменьшении давления в системе, когда начинает-

ся отбор очищенной воды в производство. Для уменьшения колебаний давления установлен гидробак 9 объемом 24 л.

Вода одновременно подается в три параллельно установленных фильтра 2. При работе фильтра на очистке, вода фильтруется сверху вниз через слой загрузки, состоящей из активированного угля и Вигм. При этом она очищается от активного хлора и органических загрязнений, а также железа и взвешенных частиц. Запорные краны 15 используются при необходимости отключения одного из фильтров для проведения с ним каких-либо работ.

Из коллектора вода подается в два параллельно включенных по системе «дуплекс» фильтра умягчения 3. «Дуплекс» отличается тем, что регенерация фильтров производится последовательно по сигналу общего счетчика расхода очищенной воды 19, расположенного на сборном коллекторе. В головках управления 18 фильтров умягчения расположены: программно-временное устройство, обеспечивающее проведение регенерации катионита, его отмывки и взрыхления, и многоходовой клапан.

Первое время качество очищенной воды было очень высоким по всем показателям. Сочетание хлорирования с дехлорированием и сорбцией на активированном угле обеспечивало окисляемость на уровне 1–2 мг  $O_2$ /л и содержание железа около 0,1 мг/л. Жесткость воды не превышала 0,1 мг-экв/л.

Основные проблемы создавала неустойчивая работа установки «Аквадез». Поэтому вместо нее был установлен насос-дозатор, который подавал товарный гипохлорит из емкости 4 в трубопровод подачи воды в емкость 1.

Через 3–4 месяца, когда поверхность активированного угля насытилась (загрязнилась) крупными органическими молекулами, не поддающимися разрушению хлорированием, эффективность очистки по органике и железу снизилась до 3–5 мг  $O_2$ /л и 0,17–0,23 мг/л соответственно. Жесткость воды никогда не увеличивалась выше 0,1 мг-экв/л.

Производить замену фильтрующей загрузки в корпусах без специальных загрузочных штуцеров затруднительно, поэтому в лаборатории были проведены опыты по поиску методов полного окисления органики. Оказалось, что наличие большого количества чрезвычайно химически устойчивых гуминовых и фульвокислот не позволяет полностью их удалить даже при дозах хлора до 100 мг/л, а озона 10–20 мг/л. Выяснилось, что остаточное железо закомплексовано с органикой и не удаляется никакими традиционными методами удаления железа. Оно извлекалось только при разрушении или удалении органики.

Необходим был поиск других путей удаления органики. На одной из действовавших на предприятии установок органика удалялась при интенсивной аэрации и последующей фильтрации через смоченную за-

грузку при малой скорости, около 0,5 м/ч. Установка работала в режиме биофильтра. Для установок большой производительности это оказалось непригодным из-за необходимости применения аппаратов больших размеров. Для данного состава воды эффективной оказалась очистка коагуляцией хлоридом алюминия. Раствор последнего дозировался, аналогично гипохлориту, в приемную емкость 1, использовавшуюся, как промежуточный отстойник-хлопьеобразователь. Вода со взвесью подавалась на фильтры. Таким путем удалось получить воду необходимого качества. Другим путем является использование специального анионита для удаления органики. Он позволил снизить окисляемость до 1 мг  $O_2$ /л, а содержание железа до 0,1 мг/л. При этом один объем сорбента позволяет очистить 15–20 тысяч объемов воды. Сорбент поддается регенерации.

С 1997 г. установка устойчиво обеспечивала работу предприятия при изменении состава и объемов воды. При сильных колебаниях состава требовался подбор доз реагентов. Качество очищенной воды соответствовало всем требованиям производства.

#### 4.2.3. Сравнение схем умягчения

Интересно сравнить применение установок с регенерацией по индивидуальным счетчикам и дуплексную, триплексную и т. п. системы.

В первом случае имеется возможность оптимизировать работу каждого фильтра. Дело в том, что количество ионита в фильтрах несколько различается, и это различие может увеличиваться по мере износа ионита. Кроме того, сопротивление фильтров также не совсем одинаково. Поэтому «проскок» жесткости может наступать не при одинаковом объеме очищенной воды. При использовании индивидуальных фильтров это различие может быть скорректировано оператором. В «дуплексе» вывод на регенерацию производится по суммарному объему очищенной воды, который устанавливается по результатам работы худшего фильтра. В результате второй фильтр оказывается не полностью насыщенным. Это увеличивает расход соли на регенерацию.

В то же время «дуплекс» всегда обеспечивает подачу воды на производство. При индивидуальных фильтрах возможен случай, когда оба фильтра выходят на регенерацию одновременно и в течение примерно 2 часов происходит перерыв в подаче воды. С другой стороны, выход из строя блока управления в «дуплексе» приводит к полному прекращению водоснабжения, а в индивидуальной системе – к сокращению его на половину. Следовательно, преимуществом индивидуальных фильтров является меньший расход соли и большая надежность, а «дуплекса» – более стабильная подача воды и несколько (на 4–7%) меньшая стоимость.

### 4.3. Водоподготовка для производства соков

Получение высококачественных соков из концентратов требует использования воды определенного и стабильного состава [20, 22, 29–32, 64, 65].

Содержание солей жесткости, хлоридов, сульфатов, суммарное количество растворенных солей и щелочность воды в первую очередь влияют на качество безалкогольных напитков.

Щелочность воды снижает кислотность напитка, поэтому требуется увеличение количества добавляемой лимонной кислоты. Расход лимонной кислоты также увеличивается при превышении допустимых пределов концентрации солей жесткости, поскольку гидрокарбонаты кальция и магния взаимодействуют с пектиновыми и дубильными веществами соков, образуя комплексные соединения, вызывающие помутнение напитка. Сульфаты и хлориды участвуют в формировании вкуса напитка. Общее количество растворенных солей не только влияет на вкус, но и может обуславливать химическую нестабильность, выпадение осадка, изменение внешнего вида напитка [64, 65].

Сок, полностью идентичный натуральному, может быть получен только при разбавлении концентрата обессоленной водой. Поскольку ее производство достаточно дорого, допускается применение умягченной воды. Качество такой воды оговорено в ТИ 10-5031536-73-10 «Требования к химическому составу воды в производстве безалкогольных напитков».

#### 4.3.1. Производство соков на ООО «Амтел»

Производство ООО «Амтел Софт Дринкс» изначально ориентировалось на выпуск качественной продукции [22]. Поэтому с самого начала предусматривалось создание водоподготовительной установки большой производительности, обеспечивающей производство водой необходимого качества.

Для сокращения производственных площадей и предотвращения возможности промежуточного бактериологического загрязнения воды из схемы исключены промежуточные емкости для ее хранения. Поэтому установка должна иметь высокую пиковую производительность, такую, чтобы иметь возможность за 30–40 минут заполнить рабочие емкости приготовления сока.

На первом этапе в качестве исходной предусматривалось использование воды как из собственной скважины, так и из городского водопровода.

Анализ воды из скважины свидетельствует о превышении концентраций по следующим показателям (табл. 4.2).

По всем другим нормативным документам (СанПиН 2.1.4.10749-01, нормативы ВОЗ для питьевой воды) качество воды из скважины следует признать удовлетворительным. Водопроводная вода г. Королева отли-

чается наличием большого количества взвеси и повышенным содержанием железа.

### 4.2. Характеристики воды, использовавшейся на для приготовления соков

Показатель	Ед. изм.	Значение		
		вода из скважины «Амтел»	вода из скважины «Мултон»	требования ТИ
Жесткость общая	мг-экв/л	5,6–7,8	7,6–8,1	0,7
Щелочность	мг-экв/л	4,8–3,1	1,8–3,1	<1,0
Водородный показатель pH		7,3	7,7	3–6
Железо общее	мг/л	0,5–0,8	0,8–3,1	0,2
Марганец	мг/л	0,2–0,3	0,32–0,76	<0,1
Сухой остаток	мг/л	300–450	300–400	<500

Перед нами была поставлена задача по определению состава оборудования и минимизации стоимости установки производительностью 160 м<sup>3</sup>/сутки при пиковой производительности 30 м<sup>3</sup>/ч для приготовления соков.

Очистку воды указанного выше состава для обеспечения заданного качества необходимо производить последовательно методами обезжелезивания, фильтрации и умягчения (натрий-катионирования). При использовании водопроводной воды требуется ее дехлорирование. Для минимизации количества, размеров и стоимости оборудования разработана аппаратурно-технологическая схема установки, в которой ряд операций совмещен в одном корпусе фильтра. Извлечение механических загрязнений, взвеси окислов железа и дехлорирование осуществляется на смешанной загрузке со специально подобранным гранулометрическим составом из активированного угля АГ-3, сульфоугля и каталитического материала типа Вirm.

Умягчение производится на сильнокислотном катионите Purolite C-100E.

По требованию заказчиков в установках применялись блоки управления с выводом на регенерацию по времени.

#### Основные характеристики установки

Установка включает в себя (рис. 4.4):

- деаэрационную колонну (D1) с автоматическим клапаном;
- трубопровод (коллектор) исходной воды;
- фильтры обезжелезивания типа CF-75 – 3 шт. (A1; A2; A3);
- фильтры умягчения воды типа SF-75 – 3 шт. (B1; B2; B3);

- фильтры обезжелезивания и умягчения типа CR-50 – 2 шт. (AB1; AB2);
- контрольный манометр;
- шаровые краны для отключения отдельных аппаратов;
- рабочие шаровые краны;
- пробоотборники;
- блоки управления фильтрами с таймерами, включающими регенерацию в заданное время;
- счетчик объема очищенной воды;
- трубопроводы.

Площадь, занимаемая установкой –  $2,5 \times 5,0 \text{ м}^2$ .

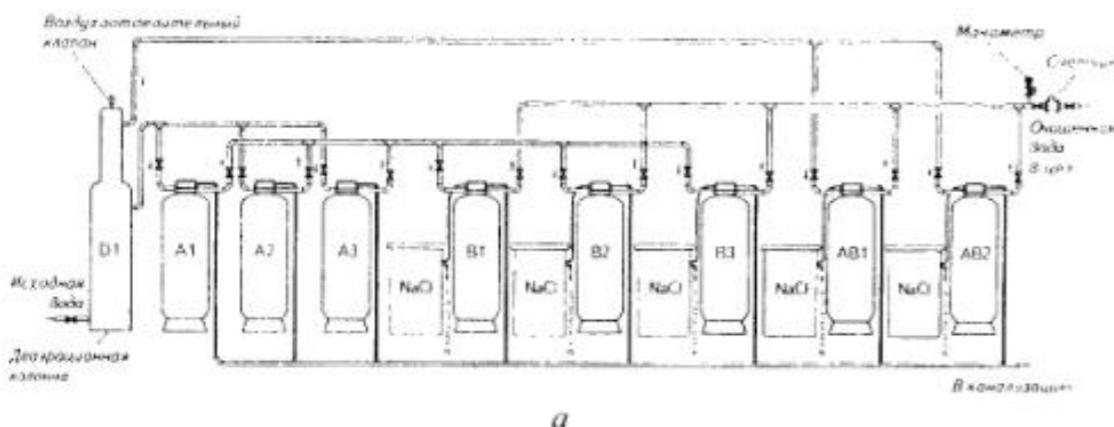


Рис. 4.4. Установка водоподготовки ООО «Амтел Софт Дринк»: схема (а), внешний вид (б)

Технические характеристики установки обезжелезивания:

марка фильтров ВГ-75Т;

количество одновременно работающих фильтров – 3 шт.;

режим работы – автоматический с включением регенерации по таймеру;

производительность 1 фильтра номинальная –  $10,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

производительность 1 фильтра максимальная –  $12,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

габариты, мм диаметр высота

– фильтра 610 2030

объем фильтрующей загрузки, л –  $3 \times 300$ .

Технические характеристики ионообменной установки:

марка – SF-75Т;

количество одновременно работающих фильтров – 3 шт.;

режим работы – автоматический с включением регенерации по таймеру и последовательной регенерацией фильтров;

производительность 1 фильтра номинальная –  $10,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

производительность 1 фильтра максимальная –  $15,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ ;

скорость воды при номинальном режиме линейная –  $30 \text{ м}/\text{ч}$ ;

габариты, мм диаметр высота

– фильтра 610 2030

– бака-солеорастворителя 740 1110

объем катионита, л –  $3 \times 300$ ;

масса в сборе, кг – 410;

рабочая обменная емкость 1 фильтра при дозе соли на регенерацию  $80\text{--}150 \text{ г}/\text{л}$  смолы, г-экв/л –  $3 \times (280\text{--}340)$ .

#### Работа установки

Вода из скважины насосом поступает в деаэрационную колонну (D1), где из нее выделяется растворенный воздух, который собирается в ее верхней части и выводится через автоматический воздухоотделитель. Из колонны вода через коллектор и краны поступает в блок управления фильтрами A1, A2, A3 и AB1, AB2.

При работе фильтра на очистке, вода фильтруется сверху вниз через слой активированного угля, антрацита и Вirm, очищается при этом от активного хлора, железа и взвешенных частиц. Затем она поступает в блоки управления фильтров B1, B2, B3 установки умягчения.

После фильтров установлены пробоотборники для отбора проб воды.

Очищенная вода из фильтров B1–B3 и AB1, AB2 через запорные шаровые краны поступает в коллектор и, пройдя через кран и счетчик, подается в цеховые сборники воды.

Приготовление насыщенного раствора соли производится автоматически в солеорастворителях.

Установка была разработана, смонтирована и запущена в эксплуатацию в 1997 г. Работа была выполнена менее чем за месяц. С тех пор она, работая в автоматическом режиме, обеспечивает высокое и стабильное качество очищенной воды при минимальном обслуживании.

#### Модернизация

По мере развития производства росло потребление воды и потребовалась модернизация установки водоочистки. Отсутствие свободных площадей потребовало нетривиального подхода к созданию новой схемы. Поскольку в то время было принято решение о работе установки только на воде из скважины, потребность в дехлорировании отпала. Было решено совместить обезжелезивание и умягчение (натрий-катионирование) в одном аппарате. Обезжелезивание, совмещенное с умягчением, может осуществляться на специальном синтетическом цеолите типа Crystal-Right 100 производства США. Однако по некоторым параметрам качество очистки на нем не полностью удовлетворяло производство. Поэтому при реконструкции установки водоподготовки для увеличения ее производительности были установлены два дополнительных фильтра (АВ1 и АВ2), позволяющие проводить обезжелезивание и умягчение в одном корпусе на послойно загруженных сильнокислотном катионите Purolite C-100E и синтетическом цеолите типа Crystal-Right. Размеры, производительность и работа этих фильтров полностью идентичны фильтрам умягчения.

Модернизация проведена в 1999 г. Установка обеспечивает пиковую производительность 50 м<sup>3</sup>/ч, высокое и стабильное качество очищенной воды, как по содержанию лимитированных компонентов, так и по микробиологическим показателям.

#### 4.3.2. Производство соков на ООО «Мултон»

ООО «Мултон» является одним из крупнейших производителей соков и имеет фирменную марку «Добрый сок». Естественно, потребность в воде у этого производства большая. Было выполнено три этапа развития системы водоподготовки. Первоначально было необходимо создать установку производительностью 45–50 м<sup>3</sup>/ч при суточной производительности 500 м<sup>3</sup>. Так же, как в «Амтеле», для сокращения производственных площадей и предотвращения возможности промежуточного бактериологического загрязнения воды из схемы исключены буферные емкости для ее хранения. Поэтому установка и должна иметь столь высокую пиковую производительность, чтобы иметь возможность за 30–40 минут заполнить рабочие емкости приготовления сока.

Анализ воды из скважины свидетельствует о существенном превышении концентраций по содержанию железа, марганца и жесткости (табл. 4.2).

В связи с присутствием железа и марганца в высоких концентрациях, режим работы фильтров обезжелезивания должен полностью соответствовать расчетным нормам. Поэтому применены крупногабаритные стальные оцинкованные корпуса с выносными блоками управления типа Fleck 3150. Для умягчения использована батарея из стандартных фильтров SF-751, аналогичных описанным выше.

#### Основные характеристики установки

Установка включает в себя (рис. 4.5):

- узел обезжелезивания;
- узел умягчения воды;
- трубопровод (коллектор) исходной воды;
- контрольный манометр;
- шаровые краны для отключения отдельных аппаратов;
- пробоотборники;
- блоки управления фильтрами обезжелезивания с таймерами, включающими регенерацию в заданное время;
- блоки управления процессом регенерации фильтров умягчения с таймерами, включающим фильтр на регенерацию;
- трубопроводы.

Площадь, занимаемая установкой, – 6,0×6,5 м<sup>2</sup>.

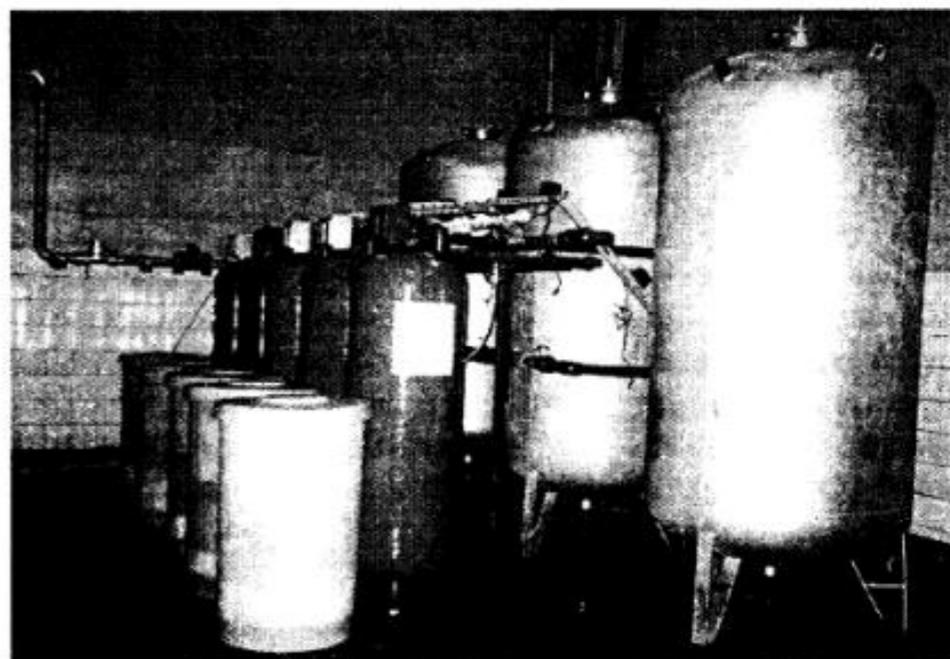


Рис. 4.5. Установка водоподготовки ООО «Мултон»

Технические характеристики узла обезжелезивания:

марка фильтров BF-125T, 3 шт.;

режим работы – автоматический с включением регенерации по таймеру;

производительность номинальная – 13 м<sup>3</sup>/ч;

производительность максимальная – 15 м<sup>3</sup>/ч;

скорость раствора при номинальном режиме линейная – 10 м/ч;

потери напора – 0,6–1,0 атм;

рабочее давление – до 6 кг/см<sup>2</sup>;

габариты, мм

диаметр

высота

– фильтра

1250

2780

объем фильтрующей загрузки, л – 3 × 1100.

Технические характеристики ионообменной установки:

марка – SF-75T, 5 шт.

Характеристики соответствуют описанным выше.

Принцип работы установки идентичен описанному выше.

С 1999 г. установка обеспечивала все потребности завода в высококачественной воде. В 2000 г. потребовалось увеличить ее производительность при наличии минимальных рабочих площадей. Был добавлен 1 дополнительный фильтр BF-125T и 3 умягчителя SF-75, включенных по схеме «триплекс» с одним общим счетчиком и блоком управления типа НВР-001. Данный блок управления обеспечивает последовательную регенерацию фильтров так, чтобы в работе всегда находилось не менее 2 фильтров.

Дальнейший рост производства завода потребовал дополнительно расширения водоподготовки.

Была создана установка по схеме (рис. 4.6), близкой к предыдущей, но с применением корпусов большего размера, как для обезжелезивания, так и для умягчения, выносных гидроуправляемых клапанов большого сечения типа Siata, электронно-гидравлических блоков управления типа Siata (рис. 2.4, в; 2.49), предварительных механических фильтров типа ФС-600 производства «НВР», а также, впервые в России, системы автоматического приготовления солевого раствора из пищевой соли. Все это резко упростило обслуживание установки и сократило занимаемую площадь.

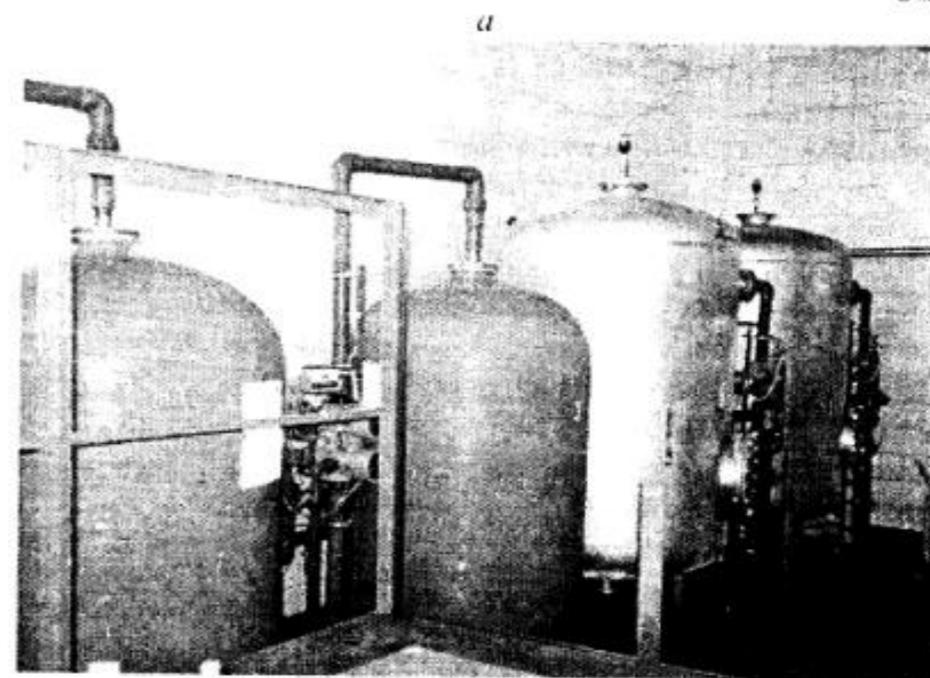
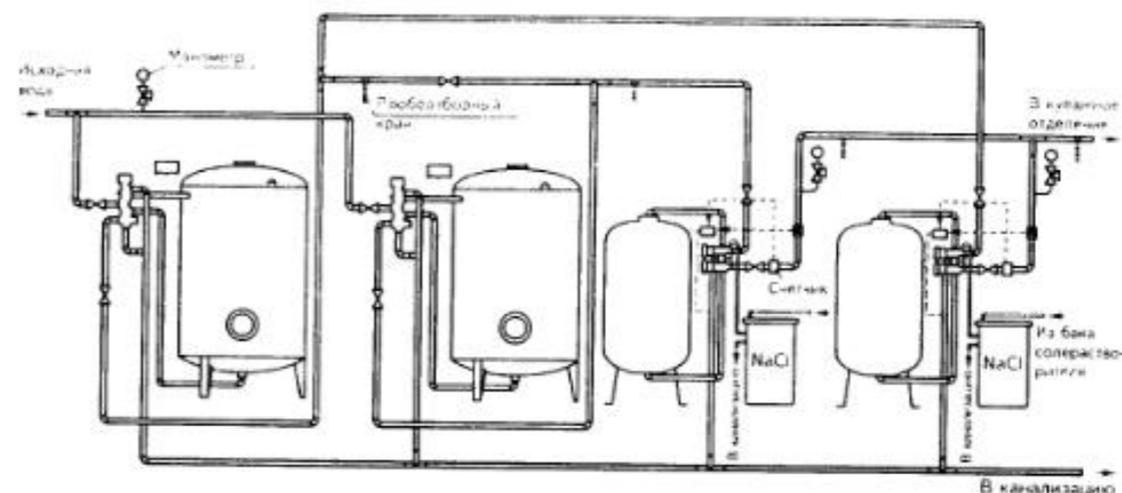


Рис. 4.6. Установка водоподготовки ООО «Мултон»: схема (а), внешний вид (б)

#### 4.4. Модернизация существующего оборудования водоподготовки

На многих производствах существуют установки водоподготовки, основанные на традиционных фильтрах отечественного производства с ручным управлением. Механическая фильтрация и частичное обезжелезивание в них осуществляется на песке, а для умягчения воды в них часто применяется сульфуголь. Иногда при работе на водопроводной воде для упрощения установок все эти операции совмещают с умягчением. Обычно такие установки с трудом обеспечивают необходимое качество

воды, потребляют большое количество соли на регенерацию, требуют больших затрат ручного труда.

Наш опыт показал возможность использования узлов такого оборудования для создания высокоэффективных автоматизированных установок с минимальными затратами [25].

На водочном производстве ООО «Раунд-М» в г. Железнодорожный Московской области используется вода из городского водопровода низкого качества. Водоподготовка ранее осуществлялась путем умягчения воды на сульфоугле в фильтре диаметром 1000, высотой 2450 мм и объемом загрузки сульфоугля 1,2 м<sup>3</sup>. Солерастворитель имел размеры 700×2500×1500 мм. Управление производилось вручную путем переключения вентиля. Растворение соли велось с применением ручного перемешивания. Качество воды было нестабильным и не соответствовало заданному ТИ 10-04-03-09-88 по лимитирующим компонентам (жесткость, железо). Это было связано с неверным выбором производительности насосов и режима регенерации сульфоугля.

Для обеспечения производства водой высокого качества была разработана установка, снабженная узлами обезжелезивания и умягчения с высокоэффективными современными загрузками и автоматической регенерацией. Низкое качество питательной воды и нестабильность давления на входе в установку потребовало тщательного расчета ее узлов и использования стабилизатора давления.

При выборе оптимального варианта реконструкции по стоимости и эффективности было принято решение об использовании существующего фильтра в качестве корпуса для узла обезжелезивания при соответствующей его переобвязке и установке блока автоматического управления регенерацией. Часть старого сульфоугля также применялась в качестве фильтрующей загрузки. Узлы ионообменного умягчения и корректировки щелочности монтировались заново.

Схема установки водоподготовки (рис. 4.7) включила в себя:

- узел обезжелезивания 1, 2;
- узел умягчения воды 3–5;
- расходную емкость с кислотой 7;
- дозирующий насос 6;
- компрессор 10 с ресивером и с системой автоматики;
- реле протока 8;
- блок управления насосом, компрессором и подачей воздуха в трубопровод исходной воды 9;
- стабилизатор давления воды в водопроводе 11;
- контрольные манометры 12;
- шаровые краны для отключения отдельных аппаратов;
- пробоотборники 13.

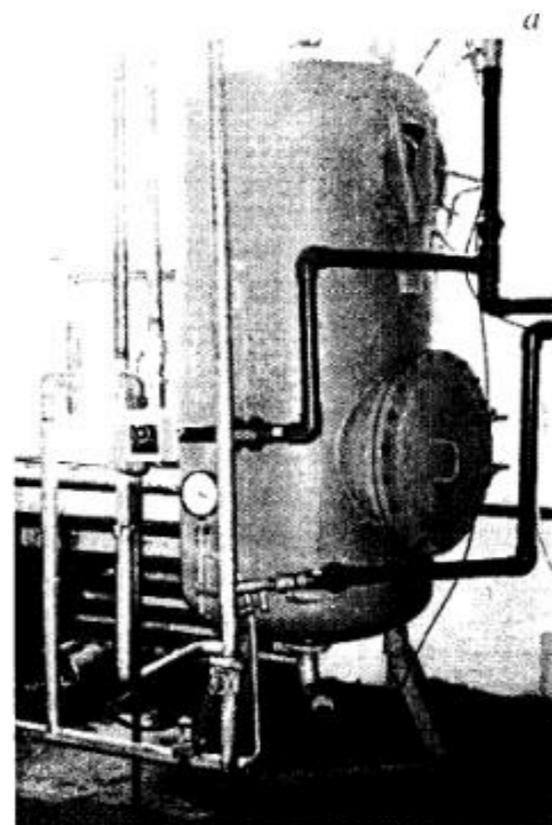
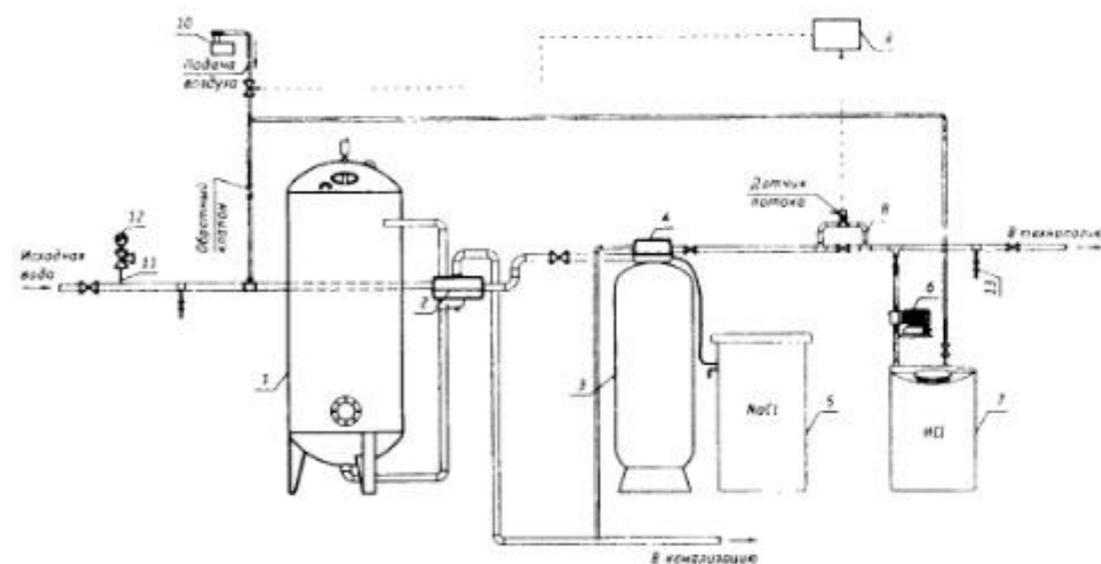


Рис. 4.7. Схема установки водоподготовки ООО «Раунд-М» (а) и модернизированный стандартный фильтр (б)

Основные характеристики установки:

режим работы – автоматический;  
 производительность номинальная – 7,5 м<sup>3</sup>/ч;  
 производительность максимальная – 12 м<sup>3</sup>/ч;  
 площадь, занимаемая установкой – 2,0×3,5 м<sup>2</sup>.

Технические характеристики установки механической фильтрации и обезжелезивания:

марка фильтров BF-100T;		
габариты, мм	диаметр	высота
– фильтра	1000	2780
объем фильтрующей загрузки, л – 800.		

Технические характеристики ионообменной установки:

марка – SF-75M.

От существовавшей схемы использовался только корпус фильтра диаметром 1000 мм. Все старые стальные трубопроводы были демонтированы. Рядом с фильтром смонтирован блок управления типа Fleck-3150, соединенный стальными нержавеющими и пластиковыми трубами Ду = 50 с корпусом фильтра и остальными узлами установки (рис. 4.7). Для улучшения очистки от железа часть сульфогля была заменена на каталитический материал Vigm и введена предварительная аэрация исходной воды в потоке.

#### Работа установки

Вода из водопровода через стабилизатор давления 11 поступает в блок управления 2. В трубопровод от компрессора 10 под давлением вводится сжатый воздух. При реакции содержащегося в воздухе кислорода с находящимся в воде двухвалентным железом оно окисляется до нерастворимого трехвалентного состояния. Ввод воздуха от компрессора производится через электромагнитный клапан, который управляется от реле протока 8 в тот момент, когда начинается разбор воды из установки.

Не растворившийся в воде воздух собирается в верхней части фильтра и удаляется из него через автоматический воздухоотделитель.

Из блока управления 2 вода через запорные краны подается в блок управления 4 фильтра умягчения 3.

Для корректировки щелочности очищенной воды используется подача соляной кислоты насосом-дозатором 6, который также включается от реле протока. Расход кислоты устанавливается при наладке.

Компрессор 10 снабжен ресивером и автоматикой поддержания давления воздуха на уровне 4–6 атм.

Длительная эксплуатация установки показала ее высокую надежность и правильность принятых технических решений. Качество воды всегда полностью удовлетворяло требованиям ТИ. Жесткость воды не превышала 0,1 мг-экв/л, содержание железа 0,1 мг/л. Высокая надежность работы установки и запас по производительности позволил установить после нее установку обратного осмоса, которая позволила снизить солесодержание, скорректировать щелочность и тем самым обеспечить выпуск высококачественной продукции.

Данный опыт модернизации показал возможность использования корпусов устаревшего технологического оборудования для создания высокоэффективных автоматизированных установок, обеспечивающих высокое качество технологической воды. Монтаж и запуск установки был проведен без остановки действующего производства.

#### 4.5. Подготовка воды для производства пива

В производстве пива вода является важнейшим сырьем и технологическим продуктом. Она используется в целом ряде процессов, и ее расход составляет 13–26 л на 1 л пива. Катионы и анионы воды оказывают влияние на pH затора, сусле и пива, что сказывается на протекании ферментативных процессов при его производстве. Они влияют на ход брожения и, в конечном счете, на вкус и стойкость пива. В отличие от производства безалкогольной продукции, при варке пива необходимо наличие солей жесткости. Однако если присутствие кальция возможно до предельного значения в 14 мг-экв/л, то соли магния придают пиву горечь. Высокое содержание натрия также нежелательно, поскольку придает кисло-соленый вкус. Избыток хлоридов замедляет процессы производства пива, а избыток сульфатов придает горький и сухой вкус [29, 31, 32, 65]. Большое значение играет щелочность воды. Она должна находиться в пределах 0,5–1,5 мг-экв/л и быть меньше концентрации солей кальция. Требования к качеству воды представлены в таблице 1.6 и в работах [64, 65].

В многочисленных отечественных публикациях рассматриваются различные варианты приготовления воды для производства пива [20, 29, 31, 32, 40, 64, 65, 120, 235, 236].

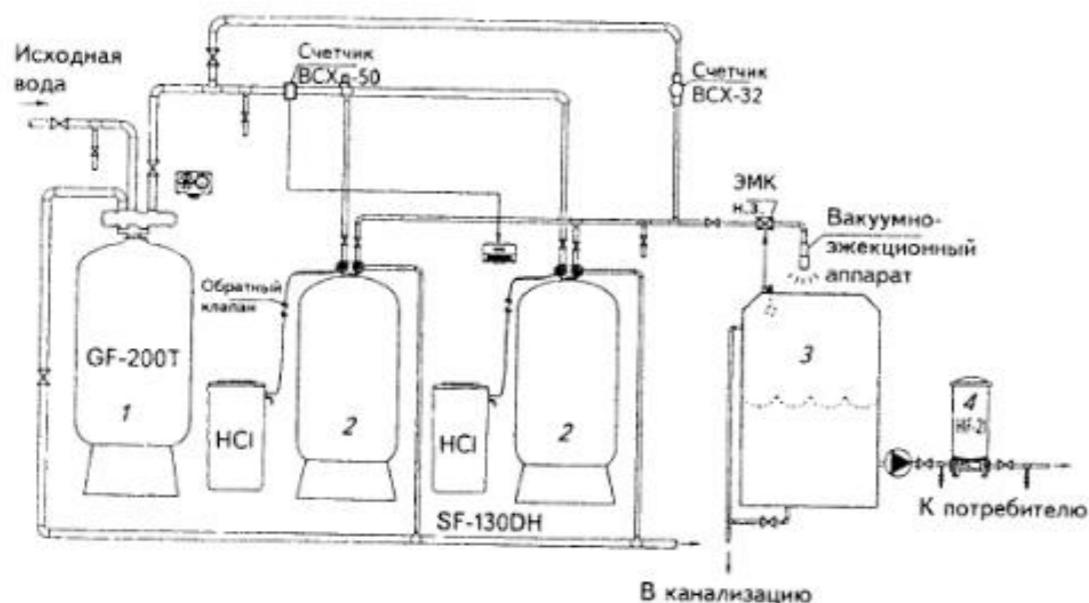
Для того чтобы обеспечить одинаковое качество и вкусовые характеристики пива, производимого в различных местах и странах, необходимо обеспечить не только идентичные условия его производства, но и идентичное качество солода, хмеля и, конечно, состав воды.

Поскольку селективно невозможно удалять из воды различные ионы, например, удалять магний, не извлекая кальций, то единственным реальным путем удовлетворения указанных выше требований является полное или частичное обессоливание воды с последующей корректировкой ее состава до необходимого уровня.

Как описано выше, обессоливание можно осуществлять ионным обменом и обратным осмосом. В пивоварении нашли применение оба этих способа.

Для вод определенного состава оказывается вполне достаточным частичное обессоливание с использованием только Н-катионирования с последующим смешением катионированной воды с исходной в таком соотношении, чтобы щелочность на выходе соответствовала требованиям

ТУ и равнялась 0,5–1,5 мг-экв/л. При Н-катионировании происходит удаление всех катионов, раствор подкисляется, и карбонат-ионы переходят в форму свободной углекислоты (рис. 1.2). Последняя может быть удалена в декарбонизаторе или при свободном изливе подкисленной воды в буферную емкость. Недостаток кальция восполняется дозировкой в очищенную воду его солей. Схема такой установки производительностью 20 м<sup>3</sup>/ч, действующей на заводе в г. Уфе (пиво марки «Сокол»), приведена на рис. 4.8 [40, 236].



**Рис. 4.8.** Схема ионообменной установки водоподготовки для производства пива:

1 – узел механической очистки-обезжелезивания; 2 – Н-катионитные фильтры; 3 – буферная емкость-декарбонизатор; 4 – картриджный микрофильтр

Недостатки такого варианта состоят в использовании соляной кислоты и в образовании сильноокислых сточных вод, которые необходимо нейтрализовать.

Перспективно использование для Н-катионирования слабокислотного катионита с голодной регенерацией. В этом случае образуются практически нейтральные стоки.

Полное обессоливание на катионите в Н-форме и анионите в ОН-форме, несмотря на описанные выше недостатки, может быть оправдано при высоких жесткости и содержании сульфатов в воде. Установки такого типа производительностью 10 и 20 м<sup>3</sup>/ч используются на «Пивоварне Ивана Таранова» [236]. Блок катионирования состоит из 3 фильтров диаметром 1200 мм с объемом катионита 1600 л в каждом. Блок анионирования также имеет 3 фильтра диаметром 1000 мм с объемом анионита по 850 л. Работа фильтров полностью автоматизирована на базе контролле-

ров, индивидуальных для каждого блока. Схема управления обеспечивает работу на операции очистки одновременно по паре катионитных и анионитных фильтров. Наряду с обессоливанием данная станция водоподготовки включает блок обеззараживания диоксидом хлора, угольные фильтры диаметром 1200 мм, картриджные микрофильтры и систему дозирования для корректировки солевого состава.

Во многих случаях, для пищевой промышленности предпочтительнее использование для обессоливания метода обратного осмоса. Установки такого типа получают все большее распространение в пивоварении. На АО «Красный Восток» эксплуатируется установка производительностью 50 м<sup>3</sup>/ч, разработанная компанией «Национальные водные ресурсы». Ее схема показана на рис. 2.31 [120], а особенности работы и эксплуатации – в разделе 3.4. При жесткости исходной воды 7,5 мг-экв/л, щелочности 4,0 мг-экв/л и pH более 7 длительная работоспособность мембран обеспечена дозированием в питающую воду ингибитора. Используются низконапорные рулонные элементы «Hydranautics» с селективностью 99%. Для кондиционирования состава очищенной воды производят добавление части исходной воды и дозировку солей кальция.

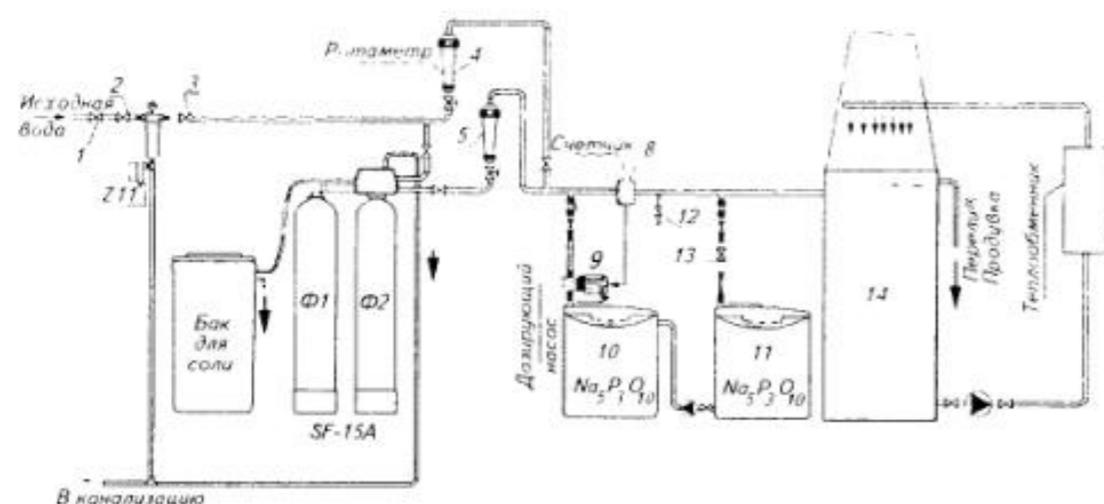
#### 4.6. Подготовка воды для подпитки теплосети

В производстве спирта необходимы подогрев и охлаждение оборудования, например, при ректификации. Теплосъем производится оборотной водой с ее охлаждением в градирнях. Использование необработанной воды приводило к зарастанию труб теплообменников через 2 недели. Карбонатные осадки с железом и биоорганическими загрязнениями приходилось высверливать.

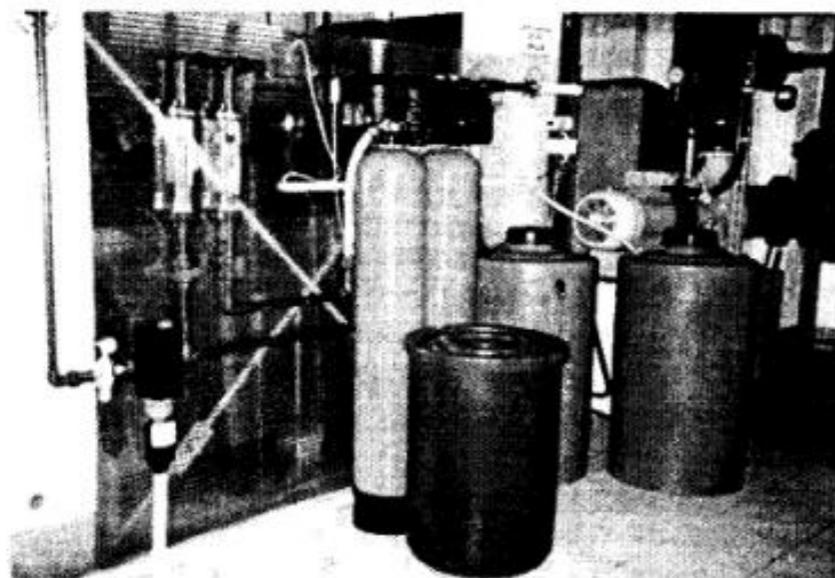
Для стабилизации работы оборудования была предложена схема (рис. 4.9), включающая умягчение воды, смешение ее с исходной, чтобы жесткость составила около 1 мг-экв/л, и пропорциональное дозирование в эту воду полифосфатов. Для обеспечения постоянной подачи воды в систему применена установка умягчения «непрерывного» действия. В такой установке постоянно эксплуатируется 1 фильтр, а второй, регенерированный, находится в резерве. После исчерпания емкости первого фильтра на очистку включается второй, а первый регенерируется.

Ввод раствора полифосфата производится системой пропорционального дозирования. Она включает счетчик воды с импульсным выходом, который дает сигнал после прохождения каждого литра воды, насос-дозатор с регулируемым объемом подачи на 1 импульс и емкость для хранения и приготовления реагента. Расход реагентов был рассчитан для выбранной жесткости, исходя из обеспечения стабильности воды.

Установка (рис. 4.9) обеспечила нормальное функционирование системы обратного водоснабжения. Аналогичные системы установлены для подпитки тепловых сетей.



а



б

**Рис. 4.9.** Установка подготовки подпиточной воды для обратного водоснабжения (а) и ее вид (б):

1 – редуктор; 2, 3, 12, 13 – краны; 4, 5 – ротаметры; 6 – узел умягчения; 7 – солерастворитель; 8 – импульсный водосчетчик; 9 – насос-дозатор; 10 – расходная емкость; 11 – емкость приготовления раствора полифосфата; 14 – градирня; Z11 – промывной фильтр

Более высокие требования к воде для подпитки теплосетей требуют и более глубокой очистки воды. Так для подпитки теплосетей в г. Москве очищенная вода после деаэрации и коррекции рН должна соответствовать следующим требованиям:

Общая жесткость, не более

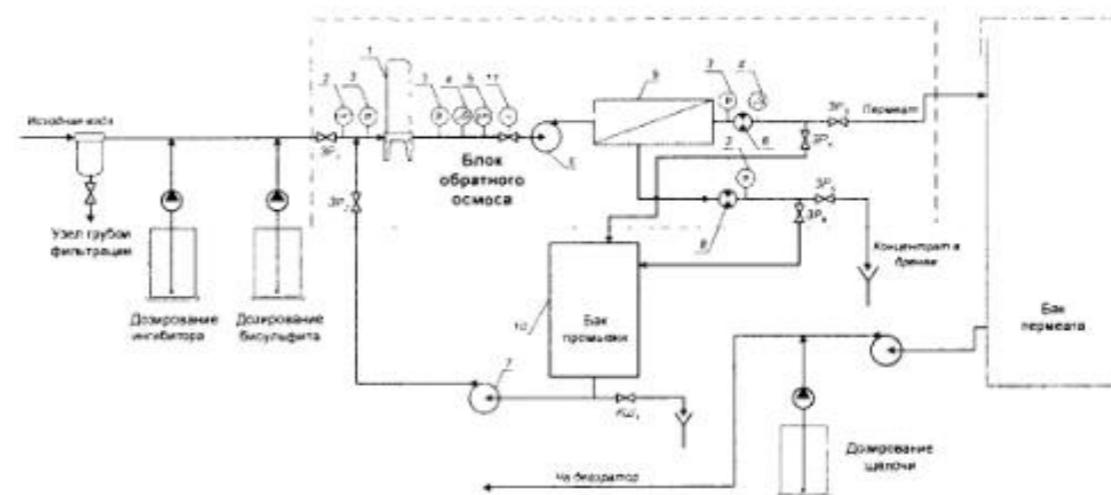
50 мкг-экв/л

Содержание растворенного кислорода, не более	30 мкг/л
Содержание свободной угольной кислоты	0
Значение рН	9–9,5
Содержание нефтепродуктов, не более	1 мг/л
Количество взвешенных веществ, не более	5 мг/л

На ряде районных и квартальных тепловых станций г. Москвы компанией «ГИДРОТЕХ» введены в эксплуатацию установки очистки воды серии «ЭНЕРГО» производительностью 35–100 м<sup>3</sup>/ч. Очистка воды в этих установках проводится обратным осмосом.

Исходной является вода Московского водопровода с общим соле-содержанием около 400 мг/л, общей жесткостью около 4 мг-экв/л и с повышенным содержанием остаточного хлора.

Учитывая данный состав воды, отсутствие в ней растворенного железа и наличие свободного хлора, в установках «ЭНЕРГО» принята аппаратурно-технологическая схема, которая включает в себя системы предподготовки исходной воды, узел обессоливания на обратноосмотических мембранах и узел кондиционирования пермеата (рис. 4.10).



**Рис. 4.10.** Схема установки «ЭНЕРГО» очистки воды методом обратного осмоса:

1 – фильтр 5 мкм; 2 – датчик окислительно-восстановительного потенциала; 3 – датчик давления; 4 – кондуктометр; 5 – рН-метр; 6 – насос высокого давления; 7 – насос промывки; 8 – расходомер; 9 – мембранный блок; 10 – бак промывки; 11 – электромагнитный клапан; ЗР<sub>1-6</sub> – задвижка ручная; КШ<sub>1</sub> – кран шаровой

Для снижения концентрации взвешенных частиц размером более 20 мкм предназначен узел грубой предварительной фильтрации на фильтрах с автоматической промывкой. Удаление основной массы взвешенных и коллоидных частиц производится на насыпном фильтре (на схеме не показан). Окончательное удаление взвесей производится на

картриджных многослойных фильтрах с рейтингом 5 микрон, которые расположены в блоке обратного осмоса.

Для защиты мембран предусмотрены 2 блока дозирования реагентов в исходную воду. Для нейтрализации пагубного действия активного хлора на полиамидные композитные мембраны обратного осмоса предусмотрено дозирование бисульфита натрия, который восстанавливает элементарный хлор до аниона  $Cl^-$ . При этом происходит также снижение концентрации растворенного кислорода. Количество вводимого реагента регулируется по величине окислительно-восстановительного потенциала.

С целью предотвращения осадкообразования на мембранах блока обратного осмоса в поток методом пропорционального дозирования вводятся микроколичества ингибитора отложений, которые некоторые называют антискалантом.

Блок обратного осмоса установки «ЭНЕРГО-100» производительностью  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  состоит из 4 многослойных картриджных фильтров, в каждом из которых 7 фильтрующих элементов глубинной фильтрации длиной 1 м с рейтингом 5 мкм, и 18 мембранных модулей по 6 рулонных элементов в каждом. Мембранные модули расположены в 3 секции, причем в первой секции 9 модулей, во второй – 6, а в третьей – 3. В секциях модули соединены параллельно по фильтрату и концентрату, а секции соединены последовательно по концентрату. Как указывалось выше, этим обеспечивается номинальный гидродинамический режим каждой мембраны и экономия исходной воды.

Как фильтры, так и корпуса мембранных модулей выполнены из нержавеющей стали, что обеспечивает долговечность работы этого оборудования и устойчивость к кислотным и щелочным моющим средствам. В установке применяются мембранные элементы типа 8040 диаметром 200 мм и длиной 1 м.

При обессоливании методом обратного осмоса водородный показатель воды снижается с 7 до 5–5,5. Для повышения pH пермеата до заданных по нормам значений производится дозирование в него щелочи.

Установки «ЭНЕРГО» оснащены блоком промывки мембран, который представляет собой бак и насос, а также необходимые стационарные коммуникации и арматуру.

Установки «ЭНЕРГО» оснащены всеми необходимыми датчиками температуры, проводимости, pH, окислительно-восстановительного потенциала, давления и расхода, управляются контроллером Allen-Bradley/Siemens с сенсорной жидкокристаллической панелью управления и легко интегрируются в АСУТП верхнего уровня предприятий, на которых они установлены.

На рис. 4.11 представлен внешний вид блоков обратного осмоса производительностью  $35 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

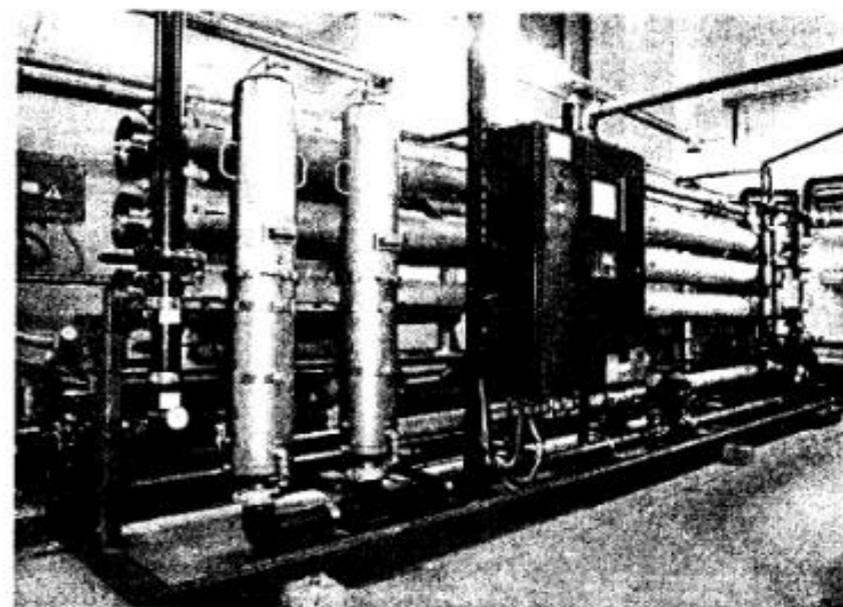


Рис. 4.11. Блок обратного осмоса установки «ЭНЕРГО-35», установленной на теплостанции

#### 4.7. Подготовка воды для теплоэнергетики

##### Водоподготовка для паровой котельной

Для питания паровой котельной производительностью 150 т пара в час требуется  $175 \text{ м}^3/\text{ч}$  обессоленной воды с содержанием  $< 5 \text{ мг/л}$ ,  $J_{\text{с}} < 0,005 \text{ мг-экв/л}$ ,  $Fe < 0,05 \text{ мг/л}$ ,  $SiO_2 < 0,08 \text{ мг/л}$ , pH 8,5–9,5. Для ее приготовления используется оборотный конденсат ( $75 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) с ухудшенными параметрами и артезианская вода в количестве  $135 \text{ м}^3/\text{ч}$ , имеющая содержание  $745 \text{ мг/л}$  жесткость  $6,5 \text{ мг-экв/л}$  и содержание  $SiO_2 12,3 \text{ мг/л}$ . По требованию заказчика заданная производительность должна обеспечиваться в любой промежуток времени, включая плановое обслуживание и регенерацию, а также аварийный ремонт аппаратов. Управление установкой должно быть полностью автоматизировано.

Аппаратурно-технологическая схема установки ВПУ-175, разработанная компанией «Национальные водные ресурсы», включает в себя: узел предварительного обессоливания артезианской воды на основе обратного осмоса – установку «Енисей-100» с максимальной производительностью  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$  и узел глубокого обессоливания смеси полученной частично обессоленной артезианской воды и возвратного конденсата на катионите и анионите.

Установка обратного осмоса «Енисей-100» выполнена из 4 параллельных идентичных блоков фильтрующих элементов с номинальной производительностью при рабочей температуре  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Поэтому при периодическом выводе одного блока раз в квартал на промывку производительность оставшихся в работе блоков обеспечивает нормальную рабо-

ту паровых котлов. Применяются рулонные модули диаметром 200 мм. Модули включены в 2 ступени последовательно по концентрату и параллельно по пермеату.

Ионообменная установка (рис. 4.12) включает две идентичные пары последовательно включенных фильтров: катионитные диаметром 2,0 м, высотой 3,7 м, со слоем моносферического катионита высотой 1,5 м и анионитные диаметром 2,6 м, высотой 4,4 м, со слоем моносферического анионита высотой 2,0 м. Максимальная производительность каждой цепочки составляет  $175 \text{ м}^3/\text{ч}$ , что обеспечивает нормальную работу котлов в период регенерации второй цепочки. Приготовление регенерационных растворов производится в потоке путем введения концентрированных реагентов насосами-дозаторами большой производительности в поток обессоленной воды. Расчеты показали, что для данного процесса выгода использования противоточной регенерации незначительна. Поэтому принят вариант с прямоточной регенерацией. Конструкция фильтров разрабатывалась специально для данного проекта. Корпуса были изготовлены по индивидуальному проекту из углеродистой стали и покрыты современными антикоррозионными составами. Дренажные системы полностью выполнены из полимерных материалов.

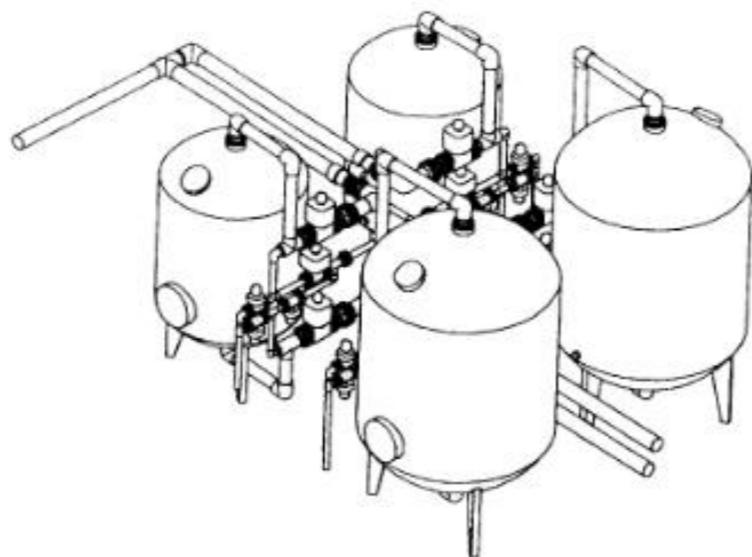


Рис. 4.12. Схема установки подготовки обессоленной воды для питания паровых котлов из артезианской воды и возвратного конденсата на катионите и анионите

Система управления включает САУ верхнего уровня с выводом всех параметров контроля и управления на ЭВМ.

Обратноосмотическая установка, элементы ионообменной установки и блоки системы управления поставлены на объект в полной заводской готовности.

### Реконструкция водоподготовки ТЭЦ-22

Научно-производственная компания «Медиана-Фильтр» предложила технические решения, которые были приняты к реализации при проведении реконструкции водоподготовки на ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго». В соответствии с предложениями компании «Медиана-Фильтр» были внесены коррективы в подготовленный ранее МОСЭНЕРГОПРОЕКТОМ (МЭП) проект реконструкции, основанный на традиционных технологических решениях.

Исходной водой является вода Москва-реки в нижнем течении в черте города. В ее состав входят: Na – 2,7 мг-экв/л; Ca – 4,8 мг-экв/л; Mg – 0,3 мг-экв/л; Fe общ. – 5,1 мг/л;  $\text{NH}_4$  – 4,3 мг/л;  $\text{HCO}_3$  – 3,8 мг-экв/л; Cl – 120 мг/л;  $\text{SO}_4$  – 72 мг/л;  $\text{SiO}_2$  – 6 мг/л; нефтепродукты – 0,62 мг/л; окисляемость – 9,6 мг  $\text{O}_2$ /л; pH – 7,5.

При разработке проекта водоподготовки ТЭЦ-22 производительностью 450–500  $\text{м}^3/\text{час}$  по обессоленной воде и 900  $\text{м}^3/\text{час}$  (с возможностью расширения до 1350  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) по воде, умягченной для теплосети, решались следующие задачи:

- обеспечить максимальную надежность и гибкость технологической схемы при эксплуатации;
- достигнуть стабильно высокого качества обработанной (умягченной и деминерализованной) воды вне зависимости от колебания качества исходной воды;
- минимизировать эксплуатационные расходы (уменьшить количество потребляемых реагентов и образующихся стоков; количество единиц установленного основного оборудования, а также арматуры и периферийного оборудования, находящегося в эксплуатации);
- обойтись минимально возможными изменениями в существующем проекте;
- оптимизировать капитальные затраты на модернизацию водоподготовительной установки;
- создать современную автоматизированную схему управления установкой, которая могла бы быть интегрирована в структуру управления станцией в целом.

Предложенная аппаратурно-технологическая схема (рис. 4.13) базируется на двух современных методах водоподготовки, которые позволяют достигнуть поставленных целей: обратном осмосе и противоточном ионном обмене. В ее основу лег многолетний опыт работы НПК «Медиана-Фильтр» в области водоподготовки и опыт зарубежных партнеров фирмы, с которыми она активно сотрудничает (например, «General Electric» и «Dow Chemical»).

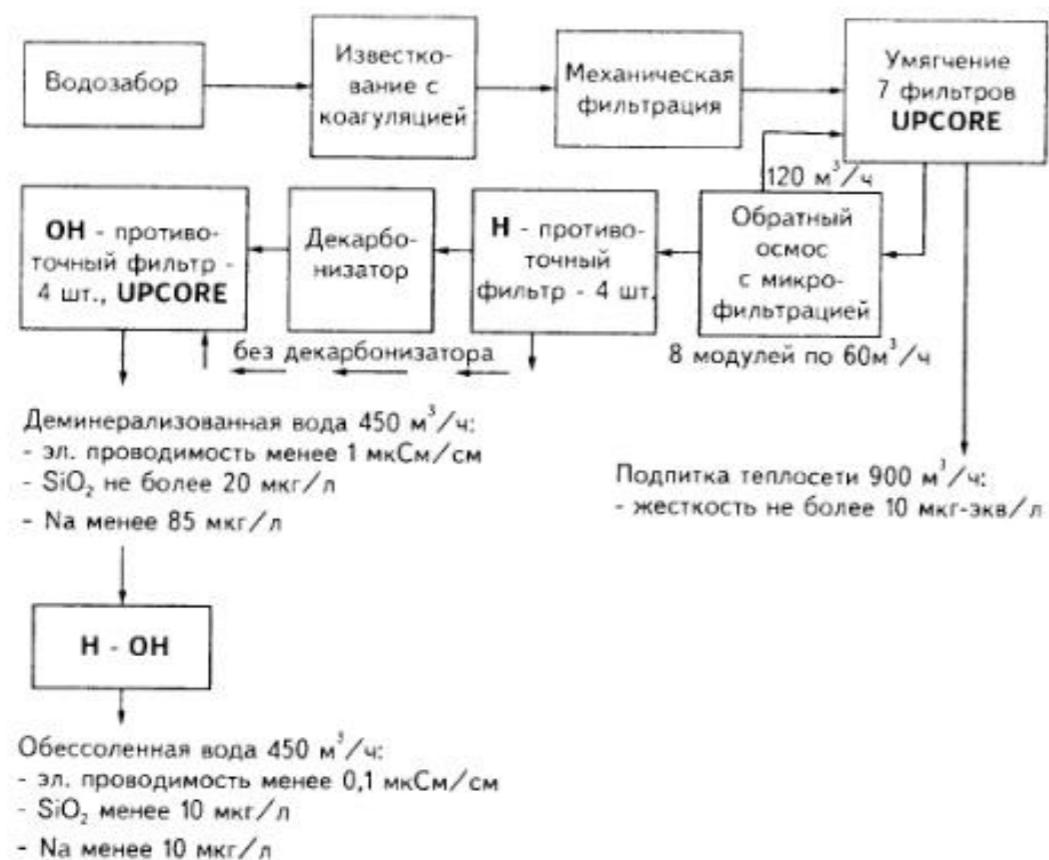


Рис. 4.13. Принципиальная технологическая схема водоподготовки на ТЭЦ-22

НПК «Медиана-Фильтр» является владельцем патентов на модернизированные варианты противоточной регенерации фильтров по технологии АПКОРЕ, утвержденных ТУ на оборудование для этого процесса и оригинальных разработок различных обратноосмотических систем. Так, например, противоточные фильтры ФИПР-А-У(О) разработаны НПК «Медиана-Фильтр» и выпускаются по ТУ-4859-004(005)-46824383-04 в соответствии с:

- лицензией «The Dow Chemical Company» от 26.02.2001 г;
- патентом РФ №2149685;
- положительным решением о выдаче патента РФ по заявке на изобретение № 2003127008 от 05.09.2003;
- патентом РФ на полезную модель № 34527;

В вариантах конструкций фильтров, выбранных для использования на ВПУ ТЭЦ-22, применены распределительные устройства в виде ложных днищ.

Расчеты процессов и оборудования производились с применением методов математического моделирования технологических процессов

на базе последнего поколения компьютерных расчетных программ CADIX 5.7.7, ROSA 5.4, WINFLOW2000 и др.

Все оборудование оснащается средствами КИПиА и управляется контроллерами нижнего уровня с возможностью интеграции в автоматизированную систему управления ТЭЦ, организованную на базе контроллера верхнего уровня.

Технологическая схема включает:

- а) известкование с коагуляцией\* (1500 м³/ч);
- б) механическое фильтрование\* (1500 м³/ч);
- в) умягчение по технологии UPCORE (1500 м³/ч с возможным расширением до 1950 м³/ч).

Далее обрабатываемая вода разделяется на два потока: 900 м³/ч (или 1350 м³/ч) умягченной воды направляются для подпитки теплосети, а 600 м³/ч умягченной воды направляется на дальнейшую обработку для получения воды, обессоленной по схеме:

- г) обратный осмос (450 м³/ч);
- д) деминерализация по технологии UPCORE (450 м³/ч);
- е) финишная очистка на отдельных Н-ОН фильтрах (450 м³/ч)\* – для котлов СКД.

Для умягчения по технологии UPCORE используются 7 фильтров ФИПР-А-У- 3,4(О) (5 фильтров в работе; 1 – на регенерации; 1 – в резерве), каждый из которых способен обрабатывать от 50 м³/ч до 400 м³/ч исходной воды.

Основные расчетные показатели блока умягчения:

Оборудование:

Фильтр ионообменный диаметром 3,4 м, шт.:	7
Расчетная производительность одного фильтра, м³/ч:	300
Фильтроцикл:	8270 м³, или 27 ч

Остаточная жесткость, мг-экв/л:	0,01
Объем загрузки ионитов (на один фильтр), м³:	28
Расход соли (по 100% веществу) на регенерацию, кг:	2050
Расход соли по стехиометрии, %:	142
Продолжительность регенерации:	1 ч 20 мин
Потребление воды на собственные нужды за регенерацию, м³:	170

Обратноосмотическая установка (рис. 4.14) производительностью 450 м³/ч по пермеату состоит из 8 модулей, каждый производительно-

\* Отмечены технические решения, которые заложены в существующем проекте, разработанном НИИ МосЭнергоПроект.

стью до 60 м<sup>3</sup>/ч (расчетная – 50 м<sup>3</sup>/ч) по пермеату. Выбраны стойкие к отравлению органическими веществами мембранные элементы «Фильмтек» типа BW30. Каждый мембранный блок построен по двухступенчатой схеме по концентрату (см. раздел 2.1.3.9).

Модульный принцип построения позволяет сократить капитальные затраты на вспомогательное оборудование (станции химической мойки мембран) и легко, с минимальными эксплуатационными затратами, адаптировать установку к работе в условиях переменной нагрузки.

Оборудование (расчетные показатели):	
Модулей мембранных, шт.:	8
(в работе – до 8 модулей одновременно)	
Производительность одного модуля по пермеату, м <sup>3</sup> /ч:	50
Подача исходной воды на один модуль, м <sup>3</sup> /ч:	69
Рабочее давление, атм:	12,5
Кол-во мембранных элементов (стойких к отравлению) в модуле, шт.:	54
Остаточное солесодержание пермеата, мг/л:	<25
(в том числе Na<9мг/л, SiO <sub>2</sub> <0,14 мг/л)	

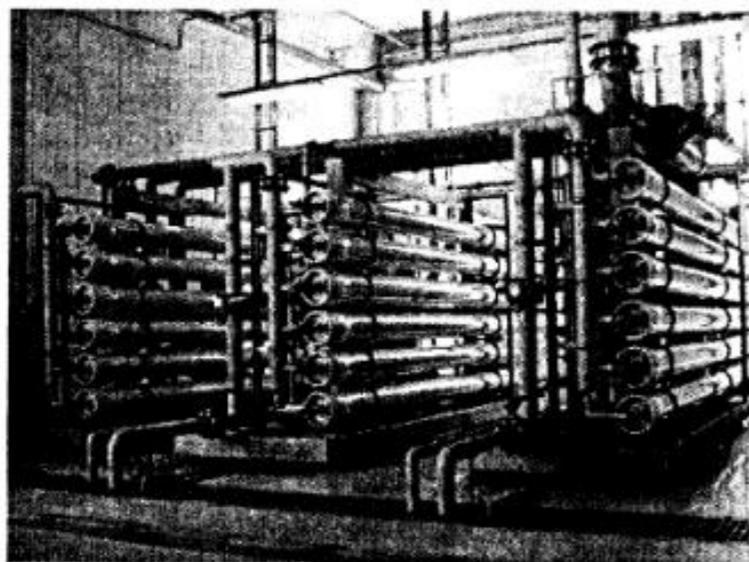


Рис. 4. 14. Установка обратного осмоса большой производительности

Для деминерализации обратноосмотического пермеата используют 4 цепочки противоточных ионообменных фильтров, работающих по технологии UPCORE (1 – в работе; 1 – на регенерации; 1 – в резерве; 1 – дополнительная на случай байпасирования обратного осмоса, чтобы, задействовав две цепочки одновременно, обеспечить длительность фильтроцикла не менее 8 часов в соответствии с действующими нормами), каждая из которых включает комбинацию из Н-фильтра и ОН-фильтров; фильтры ФИПР А-О-3,4; нагрузка на цепочку – от 50 м<sup>3</sup>/ч до 500 м<sup>3</sup>/ч.

Оборудование (расчетные показатели):	
Цепочки фильтров, шт.:	4
(всего 8 шт диаметром 3,4 м), в работе 1 цепочка:	
Производительность одной цепочки, м <sup>3</sup> /ч:	500
Фильтроцикл, м <sup>3</sup> :	49800, или 100 ч
Качество обработанной воды:	
электропроводность, мкСм/см:	< 0,9
Na, мкг/л:	< 85
SiO <sub>2</sub> , мкг/л:	< 20
Объем загрузки катионитного фильтра, м <sup>3</sup> :	28
Объем загрузки анионитного фильтра, м <sup>3</sup> :	24
Расход реагентов (по 100% веществу) на регенерацию, кг:	
серная кислота	1307
щелочь	750
Расход реагентов по стехиометрии, %:	
серная кислота	135
щелочь	129
Продолжительность регенерации, ч:	2
Потребление воды на собственные нужды за регенерацию, м <sup>3</sup> :	213

После блока финишной очистки качество обессоленной воды соответствует требованиям, предъявляемым для питания энергетических котлов СКД по основным показателям: электропроводности, остаточному содержанию натрия и силикатов.

Предложенная технологическая схема позволяет потребителю:

- существенно повысить технологическую надежность и устойчивость работы схемы;
- резко (в 15–20 раз!) сократить затраты реагентов по сравнению с ранее предложенным проектом;
- значительно снизить количество сбрасываемых стоков;
- минимизировать возможность поступления органических загрязнений (как полярных, так и неполярных) в технологический тракт котлов и турбин.

#### 4.8. Подготовка воды для производства лакокрасочной продукции

Для производства лакокрасочной продукции на водной основе требуется обессоленная вода достаточно высокой чистоты, а для обеспечения работы теплообменного оборудования – умягченная вода. На первом этапе для ООО «Лакра-Синтез» были разработаны простые и деше-

Удельная электрическая проводимость обессоленной воды – 20–50 мкСм/см при электропроводности исходной воды – не более 500 мкСм/см.

Количество обработанной воды в узле обессоливания до очередной регенерации не менее 15–20 м<sup>3</sup>.

Продолжительность регенерации и первоначальной отмывки – до 4 часов.

Объем регенераторов и промывных вод – до 1,0 м<sup>3</sup>.

Фильтры собственной разработки изготовлены из стеклопластика и нержавеющей стали.

Габариты: диаметр – 360 мм, высота – 1500 мм.

Объем общий – 150 л. Объем загрузки – 100 л.

Многолетняя эксплуатация такой простой установки показала ее достаточно высокую надежность. Она постоянно обеспечивала необходимое качество воды. При этом проведение ручной регенерации с использованием концентрированных агрессивных реагентов требовало наличия обученного персонала и соблюдения правил безопасности. Возникали проблемы и со сбросом концентрированных регенераторов.

При развитии производства потребовалось значительно увеличить производительность по обессоленной и умягченной воде. В связи с тем, что качество воды на новой территории оказалось значительно хуже: солесодержание до 950 мг/л, жесткость до 10 мг-экв/л, содержание железа до 1 мг/л, наличие взвесей и органических загрязнений, была разработана новая аппаратно-технологическая схема (рис. 4.16). Она обеспечивает получение воды необходимого качества в автоматическом режиме работы при отсутствии необходимости применения агрессивных реагентов.

Очистка воды производится методами механической фильтрации, сорбции, обезжелезивания, а также умягчения (натрий-катионирования) и обессоливания методом обратного осмоса.

Механическая фильтрация, сорбция и обезжелезивание совмещены в одном фильтре, загруженном высокопрочным активированным углем. При прохождении через него исходной воды одновременно происходит удаление органических загрязнений, окисление двухвалентного железа и извлечение взвеси окислов железа, а также взвешенных веществ.

Умягчение производится на сильнокислотном катионите Purolite C-100.

Обессоливание осуществляется методом обратного осмоса на низконапорных высокоселективных малозагрязняемых мембранах типа BW 30 размером 4040 производства «Dow Chemical».

Основные требования к показателям качества исходной воды, обрабатываемой на установке:

мутность (взвешенные вещества) не более 5 мг/л

цветность по стандартной шкале	не более 30 градусов
нефтепродукты	менее 0,2 мг/л
окисляемость перманганатная	не более 6 мг O <sub>2</sub> /л
содержание общего железа	не более 5 мг/л
общая жесткость	2–15 мг-экв/л
температура обрабатываемой воды	5–40 °С

Данная установка обеспечивает в умягченной воде общую жесткость воды до 0,05–0,2 мг-экв/л, содержание железа – менее 0,2 мг/л, окисляемость – менее 3 мг O<sub>2</sub>/л, а солесодержание обессоленной воды – менее 15 мг/л.

Умягченная вода используется для подпитки оборотного водоснабжения и как исходная для установки обратного осмоса.

Установка включает в себя (рис. 4.16, 4.17):

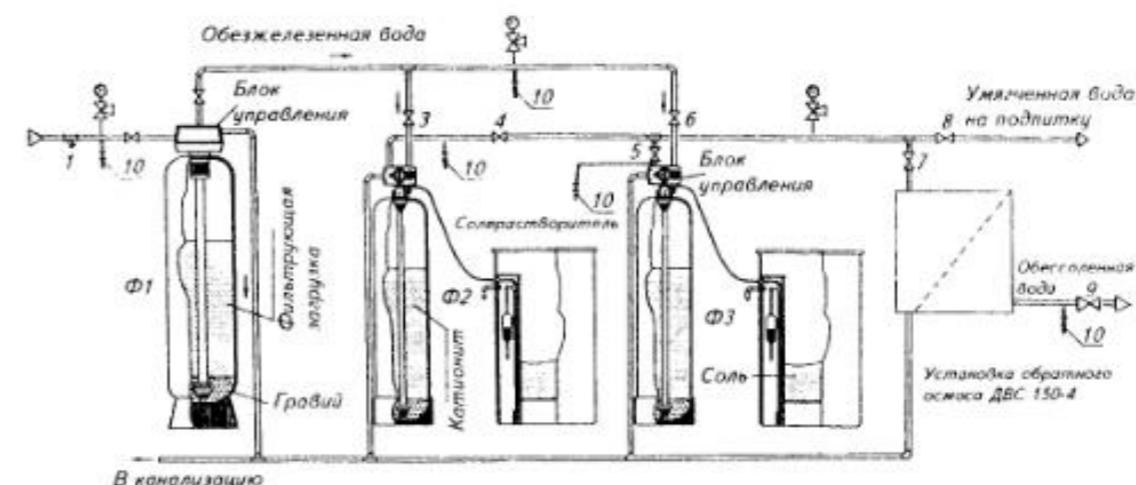


Рис. 4.16. Схема установки водоподготовки:

1 – грязевик; 2–9 – запорные краны; 10 – прободборники; Ф1 – механический фильтр; Ф2, Ф3 – ионообменные фильтры

- фильтр совмещенного удаления органики, механической фильтрации обезжелезивания (Ф1);
- фильтры умягчения воды (Ф2, Ф3);
- обессоливающую установку ДВС-150-4;
- контрольные манометры;
- шаровые краны для отключения отдельных аппаратов (2–8);
- прободборники (10);

Технические характеристики узла обезжелезивания – сорбции органики:

- марка фильтров – BF-2469T-285S;
- режим работы – автоматический с включением регенерации по таймеру;

Удельная электрическая проводимость обессоленной воды – 20–50 мкСм/см при электропроводности исходной воды – не более 500 мкСм/см.

Количество обработанной воды в узле обессоливания до очередной регенерации не менее 15–20 м<sup>3</sup>.

Продолжительность регенерации и первоначальной отмывки – до 4 часов.

Объем регенератов и промывных вод – до 1,0 м<sup>3</sup>.

Фильтры собственной разработки изготовлены из стеклопластика и нержавеющей стали.

Габариты: диаметр – 360 мм, высота – 1500 мм.

Объем общий – 150 л. Объем загрузки – 100 л.

Многолетняя эксплуатация такой простой установки показала ее достаточно высокую надежность. Она постоянно обеспечивала необходимое качество воды. При этом проведение ручной регенерации с использованием концентрированных агрессивных реагентов требовало наличия обученного персонала и соблюдения правил безопасности. Возникали проблемы и со сбросом концентрированных регенератов.

При развитии производства потребовалось значительно увеличить производительность по обессоленной и умягченной воде. В связи с тем, что качество воды на новой территории оказалось значительно хуже: солесодержание до 950 мг/л, жесткость до 10 мг-экв/л, содержание железа до 1 мг/л, наличие взвесей и органических загрязнений, была разработана новая аппаратно-технологическая схема (рис. 4.16). Она обеспечивает получение воды необходимого качества в автоматическом режиме работы при отсутствии необходимости применения агрессивных реагентов.

Очистка воды производится методами механической фильтрации, сорбции, обезжелезивания, а также умягчения (натрий-катионирования) и обессоливания методом обратного осмоса.

Механическая фильтрация, сорбция и обезжелезивание совмещены в одном фильтре, загруженном высокопрочным активированным углем. При прохождении через него исходной воды одновременно происходит удаление органических загрязнений, окисление двухвалентного железа и извлечение взвеси окислов железа, а также взвешенных веществ.

Умягчение производится на сильнокислотном катионите Purolite C-100.

Обессоливание осуществляется методом обратного осмоса на низконапорных высокоселективных малозагрязняемых мембранах типа BW 30 размером 4040 производства «Dow Chemical».

Основные требования к показателям качества исходной воды, обрабатываемой на установке:

мутность (взвешенные вещества) не более 5 мг/л

цветность по стандартной шкале	не более 30 градусов
нефтепродукты	менее 0,2 мг/л
окисляемость перманганатная	не более 6 мг O <sub>2</sub> /л
содержание общего железа	не более 5 мг/л
общая жесткость	2–15 мг-экв/л
температура обрабатываемой воды	5–40 °С

Данная установка обеспечивает в умягченной воде общую жесткость воды до 0,05–0,2 мг-экв/л, содержание железа – менее 0,2 мг/л, окисляемость – менее 3 мг O<sub>2</sub>/л, а солесодержание обессоленной воды – менее 15 мг/л.

Умягченная вода используется для подпитки оборотного водоснабжения и как исходная для установки обратного осмоса.

Установка включает в себя (рис. 4.16, 4.17):

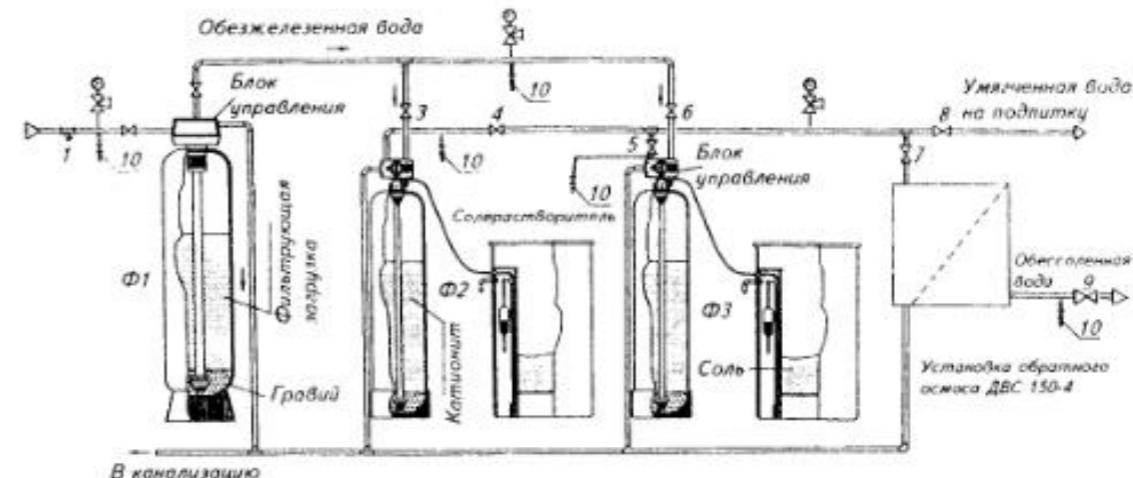


Рис. 4.16. Схема установки водоподготовки:

1 – грязевик; 2–9 – запорные краны; 10 – пробойники; Ф1 – механический фильтр; Ф2, Ф3 – ионообменные фильтры

- фильтр совмещенного удаления органики, механической фильтрации обезжелезивания (Ф1);
- фильтры умягчения воды (Ф2, Ф3);
- обессоливающую установку ДВС-150-4;
- контрольные манометры;
- шаровые краны для отключения отдельных аппаратов (2–8);
- пробойники (10);

Технические характеристики узла обезжелезивания – сорбции органики:

- марка фильтров – BF-2469T-285S;
- режим работы – автоматический с включением регенерации по таймеру;



### Работа обратноосмотической установки

В состав установки ДВС-М/150-4 входят: блок микрофльтрации, мембранный блок, блок управления работой установки и контроля качества воды, блок химической мойки и регенерации, контрольно-измерительные приборы, запорно-регулирующая арматура (рис. 4.18).

Предварительно подготовленная вода с установки обезжелезивания и умягчения подается на блок предварительной очистки, состоящий из фильтров  $\Phi 1$  с рейтингом 20 мкм и  $\Phi 2$  с рейтингом 5 мкм, удаляющий из воды взвешенные нерастворимые частицы размером более 5 мкм. Степень загрязнения фильтруемых элементов определяется по перепаду давления на манометрах  $P1$  и  $P2$ .

Далее вода поступает на повышающий насос  $H1$ . Под давлением около 10–12 атм или 14–16 атм (в зависимости от типа установленных мембран), создаваемым насосом  $H1$ , вода проходит через мембранный блок, где на специальных малозагрязняемых мембранах происходит разделение потока исходной воды на фильтрат или пермеат, т. е. воду, прошедшую через мембрану и полностью очищенную от всех взвешенных частиц и на 95–99% от растворенных в ней минеральных солей) и концентрат – воду, содержащую все извлеченные частицы и растворенные соли.

В данной конструкции используются 4 мембранных элемента типа BW30 типоразмера 4040, размещенных в мембранных корпусах из нержавеющей стали. Мембранные элементы включены параллельно по фильтрату и последовательно по концентрату. Т. е. концентрат с первого модуля поступает во второй (рис. 4.18), где из него дополнительно извлекается чистая вода, затем на третий и четвертый. Это дает возможность существенно сократить расход подготовленной исходной воды и объем сбрасываемого концентрата. Так при одинаковом давлении воды на входе в мембранный блок соотношение потоков фильтрата и концентрата должно составлять приблизительно:

1 : 4–5	для ДВС-М/150-4-1 с одним модулем
1 : 2–3	для ДВС-М/150-4-2 с двумя модулями
1 : 2	для ДВС-М/150-4-3 с тремя модулями
1 : 1,2–1,8	для ДВС М/150-4-4 с четырьмя модулями

Концентрат частично направляется на вход насоса по петле рециркуляции, а остальная его часть сливается в дренаж (канализацию).

Рециркуляция концентрата, расход которого регулируется дросселем  $Др2$ , позволяет дополнительно сократить потребность в исходной воде при незначительном ухудшении качества очищенной воды. Так соотношение расходов фильтрат : концентрат составляет:

1 : 2–2,5	для ДВС-М/150-4-1
1 : 1–1,5	для ДВС-М/150-4-2
1 : 0,75–1	для ДВС-М/150-4-3
1 : 0,6–0,75	для ДВС М/150-4-4;

Установка рабочего режима производится дросселем концентрата  $Др1$ , которым регулируется рабочее давление на мембранном блоке.

Фильтрат, т. е. обессоленная вода, поступает в накопительную емкость. Его качество контролируется по показаниям датчика электропроводности  $QE1$ . При несоответствии качества заданному контроллер включает режим гидравлической промывки мембран.

Очень важным, с точки зрения обеспечения максимальной продолжительности эксплуатации обратноосмотических элементов, является наличие так называемой фазы гидравлической промывки мембранного блока, проводимой перед началом производства чистой воды, и в течение рабочего режима очистки, с интервалом в 1 ч. Быстрая гидравлическая промывка осуществляется путем открытия клапана  $K2$ , расположенного параллельно с дросселем  $Др1$ . Вследствие этого резко возрастает поток воды через мембранный блок в цепи концентрата и падает рабочее давление на мембранах. Длительность гидравлической промывки составляет 10–50 сек.

При необходимости внеочередную гидравлическую промывку можно провести вручную, полностью открыв дроссель концентрата  $Др1$ .

### Блок автоматического управления работой установки и контроля качества воды

Блок управления реализован на электронном программируемом контроллере, который позволяет максимально автоматизировать процесс получения очищенной воды. Блок включает встроенные кондуктометры, к нему подсоединены датчики давления, сухого хода, температуры и исполнительные электромагнитные клапана.

На экране монитора контроллера отображаются величины значений электропроводности, температуры, состояния насосов, клапанов и т. д. Также по сообщениям в бегущей строке (в автоматическом режиме работы) можно судить о фазе работы установки и наличии аварийных ситуаций.

### Блок химической мойки и регенерации

В процессе эксплуатации мембраны забиваются отложениями солей жесткости, коагулировавшими коллоидами и органическими соединениями, что влечет за собой значительное снижение производительности и ухудшение качества получаемого пермеата. Для устранения этих отрицательных явлений периодически производится химическая мойка

мембран. Для ее проведения в составе установки предусмотрен блок химической мойки. Он включает в себя:

- бак для приготовления моющего раствора;
- фильтр-сетку для очистки моющего раствора от крупных механических примесей, которые могут вывести из строя насос *H2*;
- насос *H2*, для обеспечения потока и давления моющего раствора, подаваемого на мембранный блок;
- комплект дополнительных шлангов для подключения блока мойки к мембранному блоку.

Дальнейшее увеличение потребности в умягченной воде при очень низком качестве исходной воды (наличие в ней нефтепродуктов) потребовало изменить подход к ее очистке. Для получения воды заданного качества при приемлемой продолжительности работы активированного угля на первой стадии очистки (рис. 4.19) используется эжекторная отдувка растворенных летучих низкомолекулярных органических загрязнений. Подача исходной воды в бак 1 производится через электромагнитный клапан 10 и воздушный эжектор 4 собственной разработки. Получаемая в нем водо-воздушная смесь имеет большое воздушное насыщение. При ее отстаивании практически все летучие органические соединения удаляются вместе с воздухом из воды и выводятся в вентиляцию.

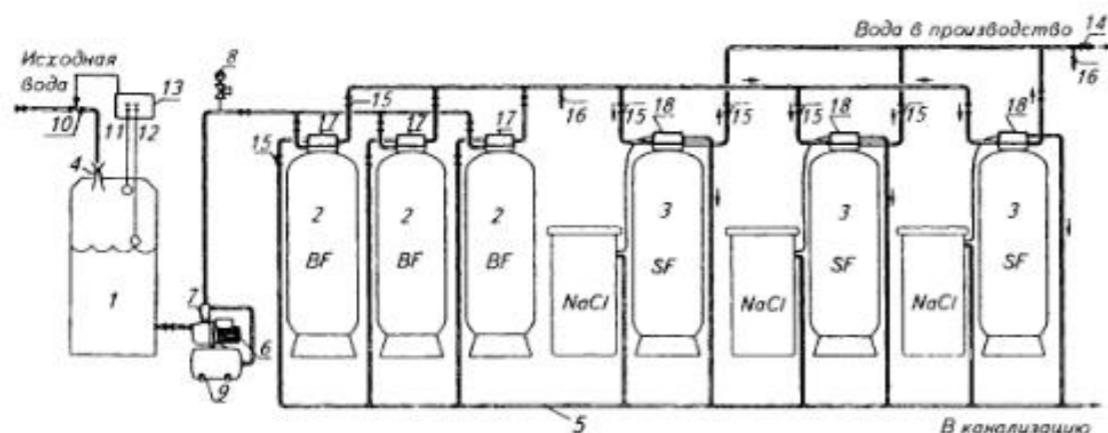


Рис. 4.19. Схема установки водоподготовки:

1 – бак отдувки органики; 2 – фильтры сорбции, обезжелезивания, механической фильтрации; 3 – фильтры умягчения; 4 – эжектор; 5 – коллектор сбросной воды; 6 – насос; 7 – реле давления; 8 – манометр; 9 – гидробак; 10 – электромагнитный клапан; 11, 12 – датчики уровня; 13 – уровнемер; 14, 15 – запорные краны; 16 – проботвертки; 17 – блоки управления таймерные; 18 – блоки управления умягчением со счетчиками воды

Уровень жидкости в баке поддерживается уровнемером 13.

При открывании клапана 14 на выходе из установки давление в системе и гидробаке 9 падает, включается реле давления 7 и начинает работать питающий насос 6 второго подъема, который создает заданный расход воды в установке.

Оставшиеся органические загрязнения удаляются на активированном угле в фильтрах 2, а умягчение производится на батарее фильтров 3, как и в предыдущей установке.

#### 4.9. Мобильные станции водоподготовки

Необходимость обеспечения качественной водой для питьевых и производственных целей имеется в большом количестве малых населенных пунктов и промышленных объектах, расположенных в удалении от транспортных магистралей. В них обычно отсутствуют свободные или стационарные помещения, пригодные для размещения установок водоподготовки. Например, нефтяные разработки в тундре или на севере находятся на болотистых почвах, где строительство фундаментальных сооружений очень затруднено. Контейнеры благодаря своей прочной конструкции могут устанавливаться прямо на грунт или на временный фундамент.

В этих условиях может быть привлекательны установки полной заводской готовности, смонтированные в транспортных контейнерах. Такие установки имеют большую стоимость, чем стационарные, но позволяют выполнить монтаж и наладку в условиях сборочного производства с высоким качеством, а сдачу в эксплуатацию провести минимальным количеством персонала.

Часто имеется необходимость переноса установок с одного объекта на другой. В этом случае единственным выходом является использование мобильных контейнерных установок, которые могут устанавливаться в местах временной дислокации того или иного объекта. Например, геологические партии или экспедиции, нефтегазовые разработки, строительные площадки и т. д. В этом случае такие установки могут демонтироваться, транспортироваться и монтироваться на новом месте силами местного обслуживающего персонала без дорогостоящего привлечения бригады специалистов из фирмы-разработчика.

Для сложных технологических систем, таких как блоки станций озонирования, даже работающих в стационарных условиях, некоторые разработчики, например, Московский институт теплотехники, размещают оборудование в контейнерах. Считается, что в заводских условиях можно со значительно лучшим качеством смонтировать и отладить оборудование.

ООО «Контур-Аква» производит мобильные станции водоподготовки (МСВ), которые представляют собой контейнерные блоки в анти-

вандальном исполнении с установленным в них оборудованием. МСВ могут транспортироваться на любом грузовом транспорте, будь то автомобиль или железнодорожный состав. Контейнер адаптирован практически ко всем контейнерным кранам и погрузчикам.

Состав оборудования для водоподготовки подбирается с учетом качества исходной воды и требований заказчика. Станция водоподготовки может состоять из узлов, размещенных в одном или нескольких соединенных трубопроводами контейнеров.

Для чрезвычайных ситуаций разрабатываются специальные МСВ. Особенность таких станций заключается в возможности их подключения непосредственно к практически любому источнику воды. Достаточно только опустить всасывающий патрубок в источник воды. Данные станции не требуют или требуют минимального количества реагентов (которые достаточно затруднительно достать при ч. с.) и полностью автономны, т. е. не требуют подключения к стационарному водопроводу и канализации и, что особенно важно, к электросети. В составе станции опционально предусматривается установка дизельных насосов и электрогенераторов. Такая станция способна работать непосредственно с машины вблизи водоема. Состав оборудования позволяет очищать даже сточную и микробиологически зараженную воду.

Состав оборудования МСВ может быть очень разнообразен. Их производительность лимитирована размером применяемого оборудования, который ограничен габаритами транспортного контейнера. Однако, выходом из такой ситуации является установка нескольких блоков, соединенных между собой.

Разработанные МСВ подразделяются на несколько типов по составу оборудования:

- МСВ высокой производительности до 500 м<sup>3</sup>/сутки по очищенной воде. Имеют в своем составе скорые напорные фильтры механической очистки, ионообменные фильтры и т. д.
- МСВ высокой степени очистки. Имеют в своем составе дополнительно к первому типу еще установку обратного осмоса, станции дозирования, насосное оборудование и т. д. Производительность одного блока такой станции не превышает 200 м<sup>3</sup>/сутки.
- МСВ для чрезвычайных обстоятельств. Полностью автономные МСВ включающие в своем составе оборудование первых двух типов плюс оборудование на основе озонирования. Максимальная производительность одного блока может достигать 200 м<sup>3</sup>/сутки.

Характерной чертой МСВ является универсальность их использования. Если стационарная станция рассчитывается исходя из характеристик конкретной воды и требований данного объекта, то МСВ может применяться для целого ряда похожих объектов. Например, зная обоб-

щенные характеристики воды в определенной местности или районе можно создать МСВ, которую можно применять на территории всего района перевоза с места на место. Несущественные различия в воде не скажутся отрицательно на работе станции.

Все оборудование МСВ полностью автоматизировано и не требует постоянного присутствия персонала. С управлением станцией может справиться один человек, который обеспечивает периодическую загрузку реагентов в расходные емкости.

Обязательный состав МСВ кроме основного оборудования для водоподготовки включает в себя систему отопления, освещения, вентиляции и пожаротушения. Опционально можно устанавливать автоматическую систему пожаротушения.

МСВ могут быть выполнены для эксплуатации в любом климате в диапазоне температур от -40 до +40 °С. Северное исполнение позволяет работать мобильным станциям водоподготовки в районе заполярного круга в условиях суровой зимы.

Разработаны варианты МСВ с использованием:

- осветления;
- обезжелезивания;
- умягчения;
- обеззараживания;
- деминерализации обратным осмосом и т. д.

Преимущества МСВ перед стационарными установками:

1. Не требуется строительства специальных помещений для водоподготовки.
2. Полная готовность станции водоподготовки к эксплуатации.
3. Удобная транспортировка.
4. Удобство при обслуживании на открытой площадке.

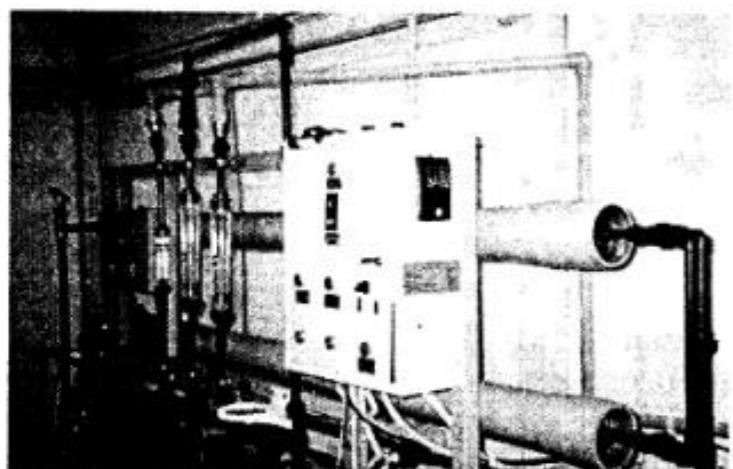
Характеристики МСВ:

1. Габаритные размеры (Д×Ш×В, мм): 6058×2438×2591 или 12116×2438×2591.
2. Вес, кг: 4300–5400 (в зависимости от комплектации).
3. Наличие утепления и системы отопления.
4. Наличие внутреннего освещения.
5. Соответствие нормам по пожаробезопасности (огнетушитель, ящик с песком).
6. Наружная и внутренняя отделка: оцинкованный профилированный лист.

В качестве реального примера приводится краткое описание МСВ, установленных на нефтяных месторождениях, разрабатываемых ТНК (рис. 4.20).



а



б

**Рис. 4.20.** Внутренний вид МСВ:

а – блок осветлительных фильтров; б – установка обратного осмоса

В состав станций включено следующее:

- Станция пропорционального дозирования перманганата калия MetersPump IMD.PC – 2 шт.
- Автоматический фильтр осветлитель FE (T)-1465 – 2 шт.
- Автоматический фильтр-обезжелезиватель MG(T) – 1465 – 2 шт.
- Автоматический умягчитель воды SPF(T) – 1465 – 2 шт.
- Автоматический сорбционный фильтр СА(T) – 1465 – 2 шт.
- Обратоосмотическая установка АкваРос-Б/1500 – 1 шт.
- Накопительная емкость 2000 л – 1 шт.
- Станция корректировки рН – 1 шт.
- Насосная станция ESPA – 2 шт.

Производительность станций 2,0 м<sup>3</sup>/час, или 50 м<sup>3</sup> в сутки, при условии непрерывной работы.

Все оборудование обвязано пластиковыми трубами, фитингами, арматурой и прочно закреплено в контейнере. Обратоосмотическая установка снабжена аварийными сигнализаторами и выключателями. Байпасная линия обеспечивает подачу воды при пожарной опасности.

Состав исходной воды отличался высоким содержанием солей жесткости, органического железа, повышенной цветностью и мутностью, наличием нефтепродуктов и высоким соледержанием – выше 1500 мг/л. После очистки вода отвечала всем требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01, а по большинству показателей отвечала стандартам ЕС.

МСВ выполнена в «зимнем» контейнере, оснащена всем необходимым оборудованием.

#### 4.10. Установка для получения воды для медицинских целей

Без применения очищенной воды не обходится ни одно фармацевтическое предприятие или аптека.

Вода очищенная используется для:

- изготовления инъекционных лекарственных средств;
- для получения пара;
- санитарной обработки;
- мытья посуды (за исключением финишного ополаскивания);
- в лабораторной практике и др.

На фармацевтическом производстве вода очищенная является исходной при получении воды для инъекций.

Ранее воду очищенную разрешалось получать только методом дистилляции, однако согласно современным фармакопейным правилам ФС 42-2619-97 ее разрешено получать различными методами, в том числе обратным осмосом.

К качеству воды очищенной предъявляются высокие требования по ионному составу – нормируется содержание сухого остатка, хлоридов, сульфатов, аммиака, нитритов и нитратов, углекислого газа, кальция, восстанавливающих веществ, тяжелых металлов; по микробиологической чистоте – не более 100 КОЕ/мл. В связи с этим для ее получения применяют двухступенчатую систему обратного осмоса с обязательной предварительной подготовкой воды, специальные виды запорной и регулирующей арматуры, а также корпуса для размещения мембран и трубопроводы, выполненные по специальным требованиям.

Одноступенчатая установка обратного осмоса при большой солевой нагрузке и высоком содержании хлоридов в воде не может обеспечить качество получаемой воды, регламентированное фармакопеей.

ЗАО «НПК Медиана-фильтр», разработаны и производятся двухступенчатые установки серии УВОИ-«М-Ф», изготовленные в санитарном исполнении с применением мембранных корпусов и систем распределения, реализованных по патентованным технологиям (патенты РФ №37986 и №34527), гарантирующих обеспечение физико-химической и микробиологической чистоты получаемого фильтрата. Они выполнены в соответствии с отечественными и международными требованиями и рекомендациями, предъявляемыми к системам водоподготовки (Guide to inspection of high purity water systems, FDA; ISPE Baseline. Pharmaceutical engineering guide for new pharmaceutical facilities; МУ 78-113 «Приготовление, хранение и распределение воды очищенной и воды для инъекций» и др.) и в свете требований, предъявляемых к производству и изготовлению лекарственных средств, – GMP (Правила надлежащего производства), ОСТ 42-510-98 «Правила организации производства и контроля качества лекарственных средств» и ГОСТ Р 52249-2004 «Правила производства и контроля качества лекарственных средств».

Для обеспечения длительной эффективной и надежной работы двухступенчатых установок серии УВОИ-«М-Ф» подаваемая на них вода должна удовлетворять как требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Вода питьевая», так и дополнительным требованиям (табл. 4.3). Поэтому обязательной является предварительная подготовка воды для освобождения ее от присутствующих примесей (механических, коллоидных частиц, солей жесткости, свободного хлора и др.) за счет использования обезжелезивания, дехлорирования, умягчения, а также барьерных микрофильтров.

Немаловажную роль для достижения оптимальных условий работы установки серии УВОИ-«М-Ф» и обеспечения требуемой производительности играют условия ее эксплуатации и своевременное техническое обслуживание (табл. 4.4).

#### 4.3. Рекомендуемые дополнительные требования к качеству воды, поступающей на установку

Показатель	Требования
Общая жесткость	не более 0,1 мг-экв/л
Содержание железа	не более 0,1 мг/л
Содержание марганца	не более 0,1 мг/л
Мутность	не более 1,5 мг/л
Коллоидный индекс подаваемой воды	не более 5
Содержание свободного хлора	не более 0,1 мг/л

При отклонении от этих требований сокращается межрегенерационный цикл установки и возможно уменьшение производительности.

#### 4.4. Условия эксплуатации

Рабочая температура воды	+5 °С – +35 °С
Максимально допустимая температура воды	+40 °С
Температура окружающей среды	+5 °С – +40 °С
Относительная влажность	Не более 80%

#### Состав установки

В комплектацию двухступенчатой обратноосмотической установки УВОИ-«М-Ф»-8040-2-1 для получения воды очищенной включены (рис. 4.21, 4.22): блок предварительной очистки воды; насосы; два мембранных блока (две ступени); блок стерилизующей фильтрации; блок управления; индикационные приборы; запорно-регулирующая арматура и блок химической мойки мембран. Система управления включает контроль качества воды и гарантированное обеспечение подачи на выход установки только воды заданного качества, защиты по «сухому ходу» и превышению давления, контроль расходов концентратов и пермеата.

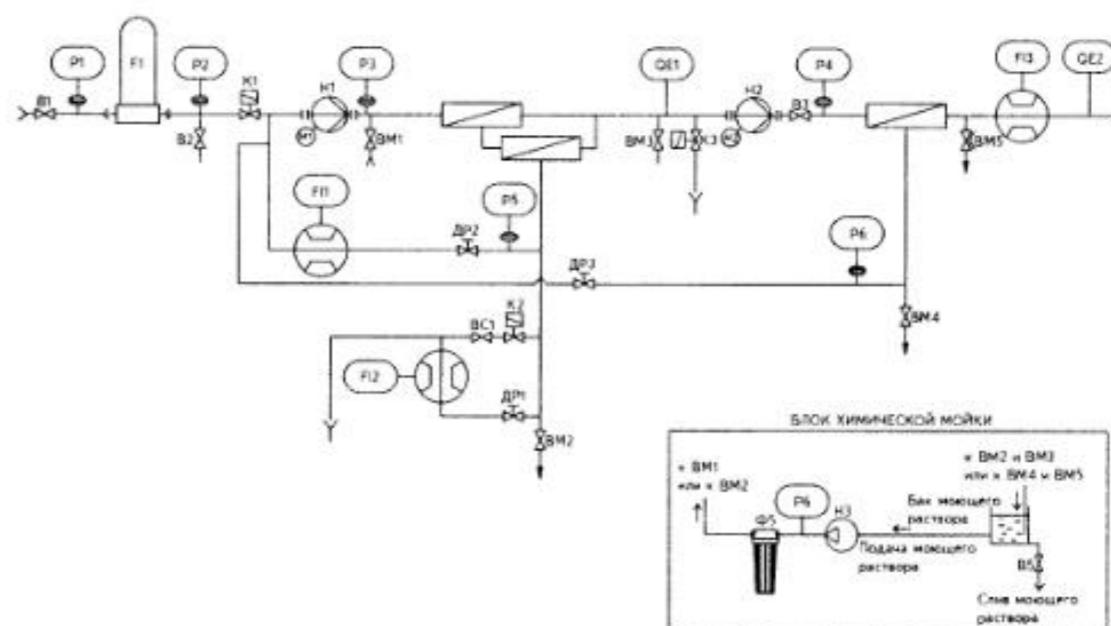


Рис. 4.21. Принципиальная гидравлическая схема двухступенчатой обратноосмотической установки УВОИ-«М-Ф»-8040-2-1;

F – патронный микрофильтр; МБ – мембранные блоки; P – манометры; F1 – расходомеры; Н – насосы; V, VM, Др – вентили; QE – кондуктометры

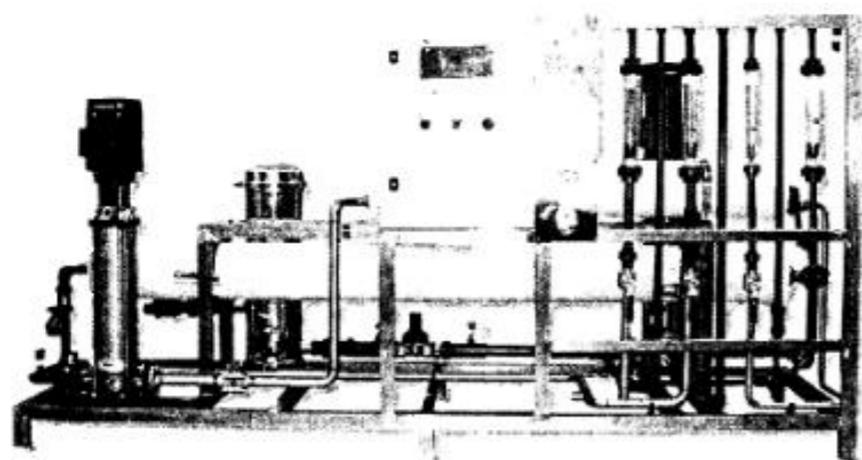


Рис 4.22. Установка УВОН-«М-Ф»-80-40-2-1

### Работа установки

Исходная предварительно подготовленная вода подается через входной вентиль *В1* на фильтр механической очистки *F1* с рейтингом 5 мкм и далее на насос *Н1*.

Вода под давлением около 15 бар, создаваемым насосом *Н1*, проходит через мембранный блок первой ступени, где происходит разделение потока исходной воды на фильтрат – воду, прошедшую через мембраны и практически полностью очищенную от растворенных минеральных солей и механических примесей, и концентрат – воду, обогащенную растворенными солями, механическими и коллоидными частицами. Концентрат частично сливается в дренаж, а другая его часть направляется обратно на вход насоса по петле рециркуляции. Наличие магистрали рециркуляции позволяет экономить дорогостоящую подготовленную воду за счет вторичного использования концентрата.

Периодически во время работы производится гидравлическая промывка мембранного блока первой ступени через автоматический клапан гидравлической промывки *К2*.

Качество воды после первой ступени обратного осмоса контролируется с помощью индикатора электропроводности воды *QE1* и контроллера. В случае если качество получаемого фильтрата ниже установленного порогового значения контроллер открывает клапан *К3* на слив фильтрата в дренаж. При достижении качества воды лучше порогового уровня клапан *К3* переключается на подачу воды на вторую ступень обратного осмоса.

Фильтрат первой ступени направляется под давлением, создаваемым насосом *Н2*, на мембранный блок второй ступени, где подвергается более глубокой очистке («полировке»), и тем самым обеспечивается полное удаление микробов и пирогенов.

Концентрат второй ступени подается на вход насоса первой ступени, как это описано в разделе 3.5.5. Это дополнительно сокращает расход исходной воды.

Качество очищенной воды на выходе из установки и режим ее работы контролируется с помощью индикатора электропроводности воды *QE2* и контроллера.

Полное отключение установки проводится с контроллера.

Основные технические характеристики установки представлены в табл. 4.5.

### 4.5. Основные технические характеристики установки

Давление исходной воды, подаваемой на установку, бар	14–16		
Максимально допустимое давление на входе в установку, бар	18		
Производительность установки при температуре	15 °С	10 °С	5 °С
	1000 л/ч	910 л/ч	750 л/ч
Потребляемая мощность, не более, кВт	0,8		
Максимально допустимый перепад давлений (на один мембранный элемент)	не более 1,4 бар		
pH, рабочий диапазон	2–11		
pH, диапазон при химической мойки и санитари-зации (30 мин)	1–12		
Степень обессоливания исходной воды в мембранном блоке	95–99%		
Размеры установки:			
	ширина	2600 мм	
	высота	1460 мм	
глубина	1000 мм		
Масса установки, кг	400–450		

### 4.11. Очистка подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа

Проблема обеспечения населенных пунктов Ямало-Ненецкого АО питьевой водой всегда была очень острой, т. к. в большинстве случаев единственным источником их водоснабжения являются артезианские скважины, вода в которых практически непригодна не только для питья, но и для хозяйственных целей.

Как правило, подземные воды Ямало-Ненецкого АО имеют малую минерализацию, низкое значение pH (иногда менее 6) и содержат много органических загрязнений и различных соединений железа (до 16 мг/л и

более). При этом вода обычно имеет сильнейший запах сероводорода, а ее температура на выходе из скважины не превышает 1–2 °С.

Сочетание данных факторов существенно затрудняет очистку воды, в особенности процессы коагуляции и фильтрации.

Задача очистки подземных вод Ямало-Ненецкого АО впервые решена специалистами фирмы «Национальные Водные Ресурсы». Технология была сначала отработана в нескольких поселках на пилотной установке (теперь эта установка эксплуатируется в детском интернате в пос. Холесовой), а затем реализована на станциях водоочистки в пос. Ханымей (производительность 100 м<sup>3</sup>/ч) и в поселке городского типа (п.г.т.) Уренгой (125 м<sup>3</sup>/ч).

Состав исходной воды в пос. Ханымей и п.г.т. Уренгой приведен в табл. 4.6.

#### 4.6. Состав исходной воды

Показатель	пос. Ханымей	п.г.т. Уренгой
температура, °С	2–2,5	1,4–1,7
pH	6,1–6,3	6,4–7,2 в разных скважинах
цветность, град.	–50	60–235 в разных скважинах
окисляемость, мг O <sub>2</sub> /л	7–10	2–10 в разных скважинах
окислительно-восстановительный потенциал, мВ	не опр.	–90...–60 в разных скважинах
железо общее, мг/л	8–16 в разных скважинах	1,8–4,0 в разных скважинах
нефтепродукты, мг/л	0,8	0,2

Технологическая схема включает следующие операции:

- подогрев;
- аэрация (отдувка сероводорода и повышение окислительно-восстановительного потенциала воды);
- дозирование окислителя (перманганата калия или гипохлорита натрия);
- дозирование гидроксида натрия (при низком pH и малом щелочном резерве);
- дозирование коагулянта;
- дозирование флокулянта;
- контактная коагуляция – осветлительное фильтрование;
- сорбционное фильтрование через активированный уголь;
- обеззараживание ультрафиолетовым облучением.

При всей кажущейся простоте и очевидности этой технологии, ее внедрение потребовало немалых усилий и времени. Дело в том, что для нормальной очистки воды требуется точное соблюдение технологических параметров в узком диапазоне, причем эти коридоры могут не совпадать даже для двух соседних скважин и меняться по сезонам.

На рис. 4.23 приведена принципиальная аппаратурно-технологическая схема станции водоочистки в п.г.т. Уренгой. Станция в пос. Ханымей отличается в деталях.

Исходная вода подогревается в пластинчатом теплообменнике 1 и поступает в промежуточную емкость 2, где производится ее аэрация сжатым воздухом, нагнетаемым безмасляным компрессором 3. Ввод воздуха производится через распределительное устройство, расположенное на дне емкости, которое обеспечивает получение мелких пузырьков воздуха с большой поверхностью. При аэрации образуется обильная плотная пена, и в воздух выделяется огромное количество сероводорода, удаляемого в вентиляцию.

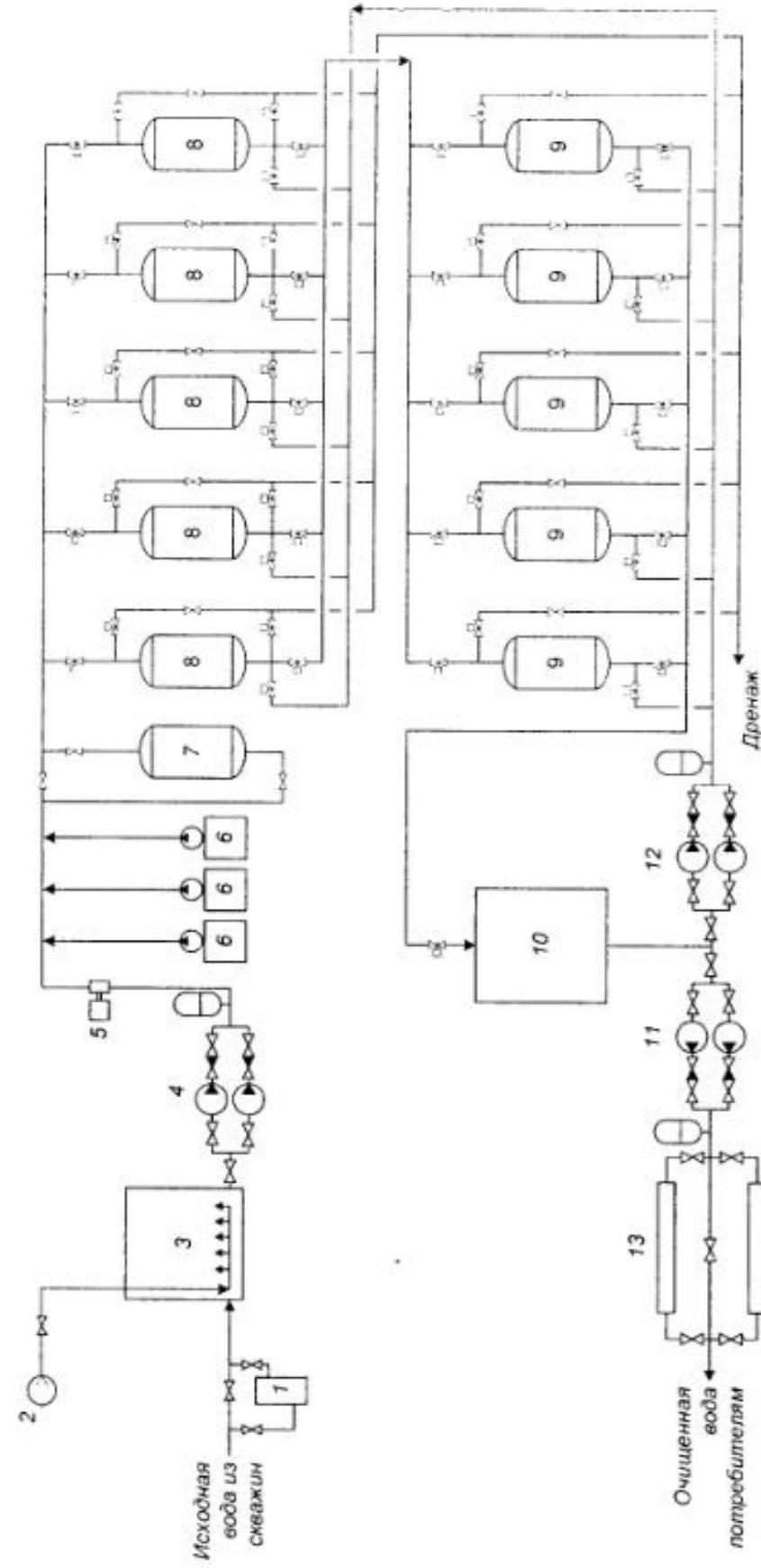
Вода, очищенная от сероводорода и насыщенная растворенным кислородом воздуха, подается на дальнейшую очистку группой насосов 4 с устройством плавного пуска.

Полного окисления железа кислородом воздуха не достигается. Отчасти это обусловлено низким pH воды, отчасти тем, что железо связано в прочные органические комплексы. Для разрушения этих комплексов и доокисления железа в воду дополнительно дозируется окислитель. В качестве окислителя были опробованы гипохлорит натрия и перманганат калия. В обоих случаях был достигнут положительный результат, но по местным условиям более предпочтительным оказался перманганат калия, т. к. затраты на его перевозку существенно ниже. Кроме того, поскольку в исходной воде присутствует разнообразная органика, при использовании перманганата калия снимается такой немаловажный вопрос, как образование хлорфенолов.

Извлечение основной массы органических загрязнений и окисленного железа производится методом коагуляции и последующего осветлительного фильтрования.

В аэрированную воду последовательно дозируются растворы коагулянта и флокулянта. В том случае, если вода имеет недостаточный щелочной резерв или слишком низкое pH, дополнительно дозируется щелочной реагент. Дозирование всех реагентов производится мембранными насосами-дозаторами 6 пропорционально расходу воды по сигналу от одного расходомера с импульсным выходом 5.

Для сокращения объема оборудования вместо традиционных отстойников применена т. н. контактная коагуляция, когда процесс образования и агломерации взвесей происходит не в объеме воды, а на частицах фильтрующей загрузки.



**Рис. 4.23.** Принципиальная аппаратно-технологическая схема станции водоочистки в п.г.т. Уренгой:

1 – теплообменник; 2 – безмасляный компрессор; 3 – азаратор; 4 – насосная станция второго подъема с устройством плавного пуска; 5 – электромагнитный расходомер с импульсным выходом; 6 – комплекс дозирования; 7 – контактная камера; 8 – осветлительные фильтры с электрозаслонками; 9 – сорбционные фильтры с электрозаслонками; 10 – резервуар чистой воды; 11 – насосная станция третьего подъема с частотным преобразователем; 12 – насосная станция промывки с устройством плавного пуска; 13 – ультрафиолетовые лампы

Вода с введенными реагентами поступает в напорную контактную камеру 7, где происходит начальная стадия образования осадка и затем подается на 5 параллельно включенных двухслойных осветлительных фильтров 8, загруженных гидроантрацитом и кварцевым песком.

Фильтрат после осветлительных фильтров, как правило, отвечает нормам на питьевую воду по всем показателям, хотя иногда отмечается незначительный проскок железа (до 0,5–0,8 мг/л). Цветность воды находится на верхней границе ПДК. Глубокая доочистка воды производится методом сорбции на активированном угле.

Вода подается в 5 параллельно включенных сорбционных фильтров 9, загрузка которых состоит из специального кокосового активированного угля, отличающегося большой емкостью и стойкостью к истиранию. Эти фильтры эффективно задерживают остаточное железо и органику и заметно улучшают органолептические свойства воды.

Полностью очищенная вода собирается в резервуаре 10, откуда она группой насосов 11 с автоматической системой управления подается потребителю.

Для обеспечения биологической чистоты вода проходит обработку в группе ультрафиолетовых облучателей 13.

Осветлительные и сорбционные фильтры работают в автоматическом режиме с выходом на промывку по времени. На рис. 4.24 показана схема осветлительного фильтра с блоком дисковых поворотных заслонок закрываемых электроприводами. Управление приводами осуществляется при помощи контроллера собственной разработки компании «Национальные водные ресурсы».

Промывка фильтров производится чистой водой из РЧВ при помощи автоматической насосной станции 12. Рабочий насос включается по реле давления, когда один из фильтров выходит в режим промывки. Промывка осветлительных фильтров – водовоздушная с использованием резервного компрессора комплекса аэрации. Общий расход воды на промывку осветлительных и сорбционных фильтров не превышает 5–7%.

Основным фактором, обеспечивающим эффективность данной технологической схемы, является полная автоматизация всех процессов, что позволяет точно выдерживать заданные режимы и свести к минимуму человеческий фактор.

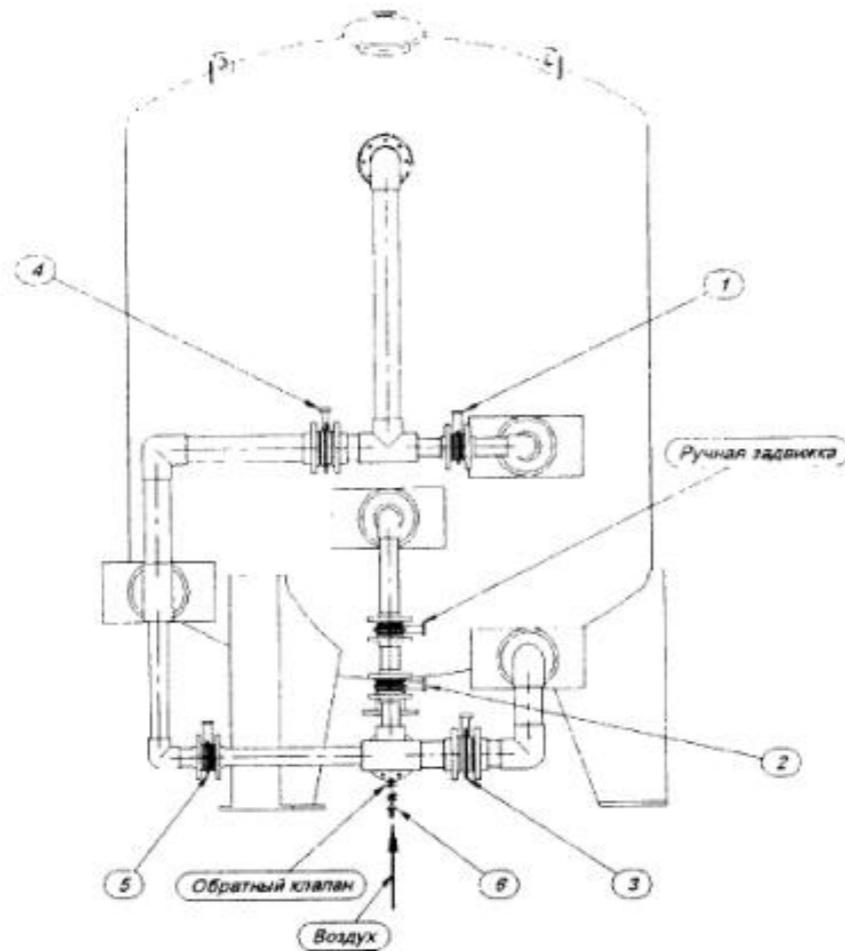


Рис. 4.24. Схема осветлительного фильтра:

1 – подвод исходной воды; 2 – отвод фильтрата; 3 – подвод промывочной воды; 4 – отвод промывочной воды; 5 – сброс первого фильтра; 6 – подвод сжатого воздуха

## 5. Бытовые малогабаритные устройства очистки воды

Бытовые малогабаритные устройства очистки воды [45, 46, 278, 296, 297], обычно называемые фильтрами, при кажущейся простоте должны обладать рядом комплексных свойств и решать те же задачи, что и крупногабаритные, специально спроектированные с учетом всех факторов применения – состава воды, режима ее потребления и т. п. Фильтры же работают в условиях полной неопределенности их применения. Это связано с тем, что потребитель, как правило, не делает анализ воды и выбирает фильтр по своему усмотрению, основываясь на его внешнем виде, рекламе и стоимости.

Условия использования бытовых фильтров очень тяжелые – высокая температура и непостоянное использование способствуют размножению микроорганизмов, для которых питательной средой являются задержанные на фильтре органические вещества. Отсутствует контроль качества очистки. При этих условиях такое устройство как минимум не должно наносить вреда, а как максимум обеспечивать высокое качество воды.

Можно выделить две группы бытовых фильтров:

- простейшие, выполняющие одну функцию;
- комплексные, обеспечивающие очистку от нескольких компонентов.

В городских условиях, в воде, прошедшей очистку на городском водозаборе, основными загрязнениями являются окисленное железо от изношенных трубопроводов, избыточные органика и активный хлор. Для сельских, дачных и походных условий загрязнения определяются местом отбора воды и могут быть структурированы как в водах поверхностных или подземных источников. В поверхностных водах основными загрязнениями являются взвеси, органические вещества и биологические объекты, а в подземных – избыточное железо и марганец, органика и жесткость.

Соответственно состав устройств для очистки таких вод должен быть различен и включать комплекс из нескольких ступеней. Однако многие фирмы предлагают одноступенчатые фильтры на все случаи жизни.

Большинство предлагаемых на отечественном рынке бытовых устройств подробно и профессионально описаны в работе [46]. Там же приводятся данные о составах вод, происхождении различных загрязнений, их влиянии на организм и истории развития процессов водоподготовки. Рекомендации по выбору системы очистки предложены в работе [45]. В данном труде предлагаются краткие сведения по таким системам и их характеристикам.

Рассмотрим предлагаемые устройства по группам:

1. однопатронные с патроном, выполняющим одну или комплекс функций;

2. многопатронные, в которых вода последовательно пропускается через несколько патронов, каждый из которых выполняет одну функцию;
3. универсальные устройства глубокой очистки с использованием мембран.

Однопатронные фильтры состоят из стандартного или специального корпуса (рис. 2.14) с размещаемым в нем патроном, выполняющим определенные функции по очистке воды. В простейшем виде в таком фильтре используется фильтрующий картридж с определенным размером пор. Он позволяет очистить воду от взвесей и окисленного железа. Ресурс картриджа зависит от его типа и загрязненности воды (раздел 2.1.3.5).

Такие фильтры могут быть полезны в городских условиях для защиты сантехнического оборудования от износа и в коттеджах в качестве дешевой по первоначальной стоимости, но дорогой в эксплуатации альтернативы засыпным фильтрам.

Фильтры типа Хонивелл (раздел 2.1.3.6; рис. 2.17) практически бесполезны в городских условиях. Для защиты от песка их легко заменяют стандартные грязевики, имеющие на два порядка меньшую цену. Для предочистки артезианской воды они, как правило, непригодны, поскольку при наличии глинистых включений сетка забивается необратимо. Их применение оправдано только при наличии в воде неслипающихся взвесей типа песка.

Разработано большое число картриджей, в которых послойно расположено несколько материалов, предназначенных для удаления различных загрязнений. Используются активные угли в виде гранул, волокон и ткани, ионообменные смолы в солевых формах, в том числе насыщенные серебром, йодом, фтором, катализаторы обезжелезивания и т. п.

К однопатронным можно отнести и микро-ультрафильтрационные установки, которые обеспечивают удаление взвесей, железа, бактерий и, частично, органических загрязнений.

Многопатронные устройства (рис. 5.1) содержат несколько (2–4) последовательно соединенных стандартных корпусов, в которые помещаются различные картриджи. Как правило, вначале устанавливается механический фильтр, защищающий последующие от забивания взвесями. Затем располагают различные картриджи для удаления растворенного железа, органических и биологических загрязнений.

В однопатронных многофункциональных картриджах, рассчитанных на воду определенного качества, в других условиях происходит преждевременный незаметный выход из строя отдельных фильтрующих слоев. Преимуществом многопатронных устройств является возможность замены отдельных картриджей, отработавших свой ресурс. К со-

жалению, опыт показывает, что очень редко потребитель следит за работой фильтров и качеством воды. Если оно снижается, большинство просто выкидывает всю систему.

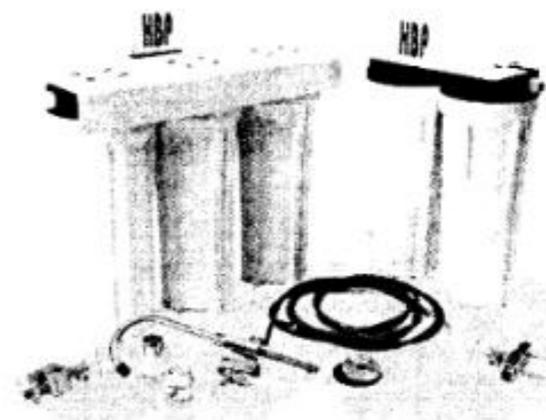


Рис. 5.1. Бытовое многопатронное устройство

Одним из наиболее интересных решений в процессах очистки воды для бытовых целей, продуктом «высоких технологий», являются бытовые мембранные установки. Они выпускаются большим числом производителей и их цена постепенно падает, приближаясь к стоимости многокорпусных устройств. Такие установки предлагаются как обратноосмотические, реально они работают при давлении от 2 атм, и в них используются нанофильтрационные мембраны. Причем во всех устройствах производства любых фирм применяются идентичные мембранные элементы ведущих мировых производителей. Такие установки могут комплектоваться насосом повышения давления, ультрафиолетовым обеззараживателем и минерализатором. Последнее важно, поскольку применение для питания обессоленной воды вызывает споры медиков, да и не всем потребителям нравится ее вкус. Качество воды, обеспечиваемое такими устройствами, наилучшее. При приготовлении пищи в нее все равно вносятся необходимые соли. Недостатком подобного типа установок является их малая производительность – 100–200 л в сутки, причем одновременно можно забрать не более 2–3 литров. Однако ее вполне хватает на семью из нескольких человек. Кроме того, необходимо учитывать, что для приготовления 1 л чистой воды расходуется не менее 3–5 л исходной воды.

Мембранная установка показана на рисунке 5.2. Она содержит в своем составе механический 4 и угольный 5 предфильтры, мембранный модуль 2 и угольный постфильтр 7, а также буферную емкость – гидробак 6. Система простейшей автоматики 3 обеспечивает работу в режиме накопления чистой воды в гидробаке до тех пор, пока давление в нем не сравняется с давлением в питающем трубопроводе. После этого пропуск

воды через установку прекращается. Отбор чистой воды производится из гидробака, давление в нем падает, и работа установки возобновляется до заполнения гидробака.

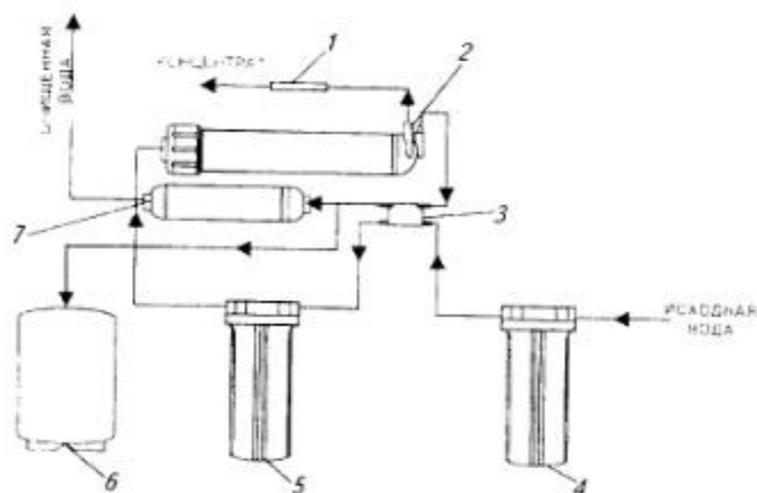


Рис. 5.2. Схема бытовой мембранной установки:

1 – регулятор расхода концентрата; 2 – мембранный модуль; 3 – гидрореле; 4 – предфильтр 5 мкм; 5 – угольный предфильтр; 6 – гидробак; 7 – угольный постфильтр

Очищенная обессоленная вода (солесодержание порядка 20–30 мг/л) пропускается через угольный постфильтр 7 для улучшения органолептических показателей.

Для создания оптимального химического состава воды – жесткость 1,5–2,0 мг-экв/л, рН 7–8, воду дополнительно пропускают через картридж, загруженный кусками минерала, содержащего карбонат кальция. При его медленном растворении рН поднимается, вода становится стабильной, сбалансированной и наиболее вкусной.

Приобретая бытовой фильтр, необходимо уяснить себе, зачем он ставится. От этого зависит, какой фильтр необходим, и необходим ли он вообще.

В большинстве крупных городов с нормально работающими системами водоподготовки качество воды реально удовлетворяет всем нормам. Возможно сезонное появление посторонних запахов и привкусов, а также мути, взвесей после проведенных ремонтов.

В этих условиях целесообразно установить на весь поток воды механический фильтр и угольный на питьевую воду. При отсутствии органических загрязнений и взвесей ресурс работы угля очень велик (раздел 3.8.). Если жесткость воды велика либо потребитель желает использовать для приготовления пищи и питья воду оптимального состава, необходимо проводить ее умягчение. Для умягчения используют одноразовые кар-

триджи при условии регулярной их замены или регенерации. Целесообразнее применение малогабаритной автоматизированной установки (раздел 3.3) либо частичное обессоливание обратным осмосом на малогабаритной установке.

Для населенных пунктов с низким качеством воды – повышенным содержанием взвесей, цветностью, запахом и т. п. – необходимо использование многопатронных устройств с комплектом картриджей механической очистки и с активным углем либо однопатронных с комбинированными картриджами. Поэтому целесообразно разделить потоки хозяйственно-бытовой и питьевой воды. На общем потоке необходимо устанавливать механическую очистку и, возможно, угольный фильтр. Для питьевых целей – дополнительно комбинированную или мембранного обессоливания.

В условиях загородного дома, где используется артезианская вода, практически всегда требуется обезжелезивание. Для очистки небольших количеств воды пригодны фильтры серии «Гейзер», имеющие относительно высокую емкость по железу. Возможно использование промежуточной емкостью, в которой производится окисление железа и его частичное осаждение, после чего вода насосом подается через механический (желательно поверхностный, лепестковый фильтр, который можно регенерировать отмывкой) либо угольный картридж в систему.

При использовании поверхностной воды необходимо обеспечить очистку от органических и биологических загрязнений. Поэтому следует выбирать фильтры, содержащие обеззараживающие загрузки (например, йод), или установить в последнем корпусе устройства картридж с рейтингом менее 1 мкм. Ориентировочный выбор необходимых методов очистки воды в зависимости от состава загрязнений можно сделать по таблице 5.1.

Следует отметить, что многие производители вольно или невольно существенно завышают ресурс работы фильтров. При всех утверждениях об использовании уникальных материалов, реально применяются те же материалы, что и в остальных устройствах. Поэтому, например, ресурс по умягчению воды с жесткостью 6 мг-экв/л картриджа объемом 0,5 л с катионитом типа КУ-2-8чс, имеющим емкость до 2000 мг-экв/л, реально составляет всего 170 л. Ресурс картриджа по обезжелезиванию воды с содержанием железа 3 мг/л, составляющий 100 м<sup>3</sup>, означает, что на картридже задержится 300 г железа или примерно 600 г его гидроокиси, что при влажности значительно более 90% означает объем более 5 л! Аналогично трудно ожидать извлечения большого количества тяжелых металлов несколькими миллилитрами сорбента, помещаемого в многофункциональные картриджи.

Бытовые системы очистки воды являются достаточно сложными системами, выбор которых желательно доверить специалисту, предварительно сформулировав свои требования и определив финансовые

возможности. Как любые высокотехнологические продукты, они требуют определенного обслуживания. При эксплуатации необходимо внимательно следить за качеством очищенной воды и регулярно выполнять предписанные производителем операции (промывки, регенерации, замены картриджей). В противном случае вместо пользы от такого устройства можно получить вред.

### 5.1. Возможность улучшения показателей качества воды бытовыми фильтрами

Улучшаемые показатели	Основные примеси (свойства)	ФИЛЬТРЫ																
		механические			мембранные				сорбционные		ионообменные							
		З		С	М	У	Н	О	АУ	АУ+ Ag	КОС			АОС				
		П	М	(Пр)							Na	H	Ag	Cl	I	OH		
Органолептические	М Механические примеси	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	М Водоросли	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	М Бактерии				+	+	+	+	+	+								
	Ц Крупные органические молекулы					+	+	+	+	+								
	Ц Комплексные соединения железа и других металлов				+	+	+	+	+	+	+	+	+					
	Ц Ионы меди и кобальта						+	+	+	+	+	+	+					
Физико-химические	К рН – водородный показатель													+				+
	К Концентрация катионов (в том числе тяжелых металлов и радионуклидов)								+	+	+	+	+	+				
	К Жесткость воды			+			+	+					+	+				
	К Концентрация анионов (в том числе нитратов, нитритов, фосфатов)								+							+	+	+
	О Органические и минеральные вещества, способные к окислению					+	+	+	+	+	+							
БЛ	Б Бактерии				+	+	+	+	+	+					+	+	+	
	В Вирусы						+	+	+	+					+	+	+	
	- Бактерицидность материала									+					+	+	+	

## 6. Вспомогательные устройства, насосы-дозаторы

Насосы-дозаторы [298–301] широко используются в установках подготовки питьевой и технической воды для систем водоснабжения, отопления и энергетики. Они осуществляют дозирование реагентов, предназначенных для решения целого ряда технологических задач, таких как:

- коррекция солевого состава воды, контроль и поддержание в заданном диапазоне ее физико-химических параметров (рН, окислительный потенциал);
- дозирование ингибиторов для подавления коррозионной активности воды и для предотвращения образования отложений на теплопередающих поверхностях;
- дезинфекция воды.

Такие насосы должны обеспечивать высокую точность дозирования, быть надежны и удобны в управлении, стойкими к агрессивным химическим веществам.

К сожалению, отечественные насосы-дозаторы никогда не отличались высокими надежностью и другими эксплуатационными параметрами.

Появление в 90-х годах принципиально нового поколения импортных насосов-дозаторов, имеющих высокую точность дозирования, возможность легкой и оперативной перестройки режима работы, дистанционного управления импульсными и стандартными сигналами систем КИПиА и при этом изготовленных из пластмасс, стойких к самым агрессивным химическим реагентам, дало возможность существенно расширить область их применения, вплоть до малогабаритных бытовых устройств, домашних бассейнов и т. п. Многочисленными фирмами выпускается широчайшая номенклатура насосов-дозаторов по типу и производительности, с возможностью программируемого ввода реагентов для автоматического поддержания заданных величин рН, концентрации активного хлора, окислительно-восстановительного потенциала и т. п.

Исходя из особенностей конструкции, можно выделить несколько основных типов дозирующих насосов:

- поршневые;
- мембранные;
- перистальтические.

Наиболее известными производителями насосов-дозаторов являются «Prominent» и «Grundfos». На рынке широко представлены более дешевые насосы производства «EMEC», «Pulsatron», «Etatron», «Astral», «Seco», «Stenner», «Meterpump», «Grunbeck» и др. Большинство из них

являются мембранными с электромагнитным приводом. Значительно реже предлагаются и применяются перистальтические насосы.

**Поршневые насосы** являются самой старой традиционной конструкцией, наиболее распространенной в России. Рабочим органом поршневого насоса является поршень из нержавеющей стали, который приводится в движение электродвигателем через редуктор с кулачковым механизмом. При возвратно-поступательном движении поршня в цилиндре, снабженном клапанами на линиях засоса и нагнетания, происходит попеременное засасывание раствора в цилиндр и его последующее вытеснение в напорный трубопровод. Производительность таких насосов регулируется ходом поршня в относительно небольших пределах. Давление и производительность определяются мощностью электропривода и размерами поршневой группы. Производительность может составлять сотни литров в час, а давление сотни атмосфер.

Насосы такого типа незаменимы, когда необходимы высокие давления, для дозирования эмульсий и суспензий с высокой кинематической вязкостью (порядка  $10^{-4} - 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ), с плотностью до  $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$  и более.

Органическими недостатками такой конструкции являются пульсирующая подача, возможность протечек агрессивных реагентов, невозможность организации дистанционного управления расходом раствора и непосредственный контакт движущихся металлических частей с рабочими растворами.

Последний частично устраняют, используя промежуточную разделительную мембрану или сильфон. Пространство между поршнем и мембраной заполняется машинным маслом, через которое мембране сообщается колебательное движение. С транспортируемым раствором контактирует только мембрана, которая может быть изготовлена из материала, стойкого к данной среде, например, из фторопласта.

На российском рынке этот тип дозирочных насосов представлен моделями ведущих производителей: Makro/5 НМН (Prominent); НД, НДР, НДЭ, НДГ, НДГЗ, НДГЭ, НДС, НДСР, НДСЭ (все – ЗАО «ДНС») и др.

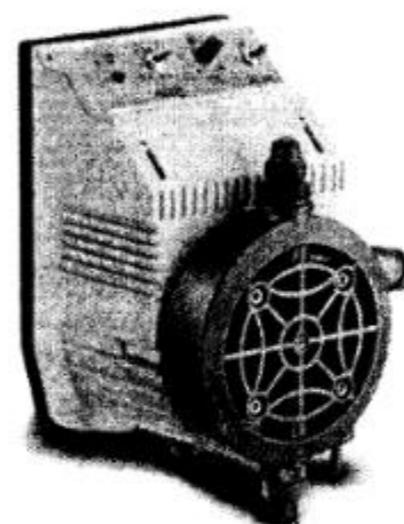
В **мембранных дозирующих насосах** всасывание и вытеснение раствора из рабочей камеры дозирующей головки происходит за счет вынужденного колебания мембраны, являющейся одной из стенок камеры. Как и в поршневых насосах, камера снабжена клапанами на линиях засоса и нагнетания.

Колебания мембраны могут быть созданы электромагнитным, электромеханическим и пневматическим приводами.

Наиболее распространены электромагнитные (соленоидные) дозирующие насосы, в которых колебательное движение передается на мембрану посредством соединенного с ней штока, движущегося в электромагнитном поле соленоида.

Регулировка дозирования осуществляется посредством изменения амплитуды и частоты хода штока. Особенности такой конструкции обуславливают примерно равную продолжительность относительно коротких периодов всасывания и нагнетания за время одного рабочего цикла.

Поскольку мощность такого привода невелика, мембранные соленоидные насосы применяются, как правило, при невысоких значениях противодавления – там, где не требуется большой напор и высокая производительность. В своем большинстве – это компактные аппараты, имеющие максимальную производительность до  $50 \text{ л}/\text{ч}$ , а давление до 20 бар (рис. 6.1).



**Рис. 6.1.** Мембранный соленоидный дозирующий насос

Дозирующая головка изготавливается из пластических масс, клапана – из керамики или спецстали. Материал подбирается применительно к используемой среде. Практически во всех конструкциях используется мембрана из фторопласта, наиболее химически стойкого материала, обладающего и хорошей устойчивостью к изгибающим усилиям. Это обеспечивает длительную эксплуатацию главного рабочего органа насоса. Считается нормальной бездефектная постоянная работа мембраны при частоте колебаний до нескольких сотен в минуту в течение года и более. При этом раствор подается практически непрерывно. В дорогих моделях немецкого производства используются композиционные мембраны, состоящие из нескольких слоев и имеющие еще большую надежность и ресурс.

Корпуса дозирующих головок изготавливают из полипропилена, ПВХ, метилметакрилата (оргстекло), ПВХДФ. Для дозирования сильных окислителей, например, хлорсодержащих реагентов в высоких концентрациях, применяют головки из ПВХ, оргстекла, ПВХДФ. Для менее агрессивных растворов используют более дешевые из полипропилена.

Практически все дозирочные насосы оснащаются электронными блоками управления, которые задают частоту, а иногда и амплитуду, импульсов. Они позволяют регулировать производительность в пределах 10–100% от максимальной.

Наибольший интерес представляет возможность дистанционного управления такими насосами. Причем управляющим сигналом может быть импульсный сигнал, поступающий, например, от водяного расходомера, либо стандартный токовый сигнал 0,4–20 мА.

В моделях с импульсной системой управления насос осуществляет подачу в соответствии с внешним сигналом от замыкающегося контакта. При работе в режиме пропорционального дозирования на каждый импульс от водосчетчика, соответствующий определенному объему воды, насос выполняет заданное число дозирующих импульсов, подавая в трубопровод определенный объем реагента.

При необходимости поддержания заданного значения какой-либо величины, например, pH, концентрации активного хлора или редокс-потенциала, устанавливается специальный контроллер, который управляет работой насоса в импульсном или токовом режиме.

Приборы контроля параметров среды используются стандартные или специальные малогабаритные, которые выпускаются для комплектации именно насосов-дозаторов. Причем иногда они производятся в виде моноблока, удобного в обслуживании (рис. 6.2).

Сравнительно недавно на отечественном рынке появилась новая разработка компании Grundfos – мембранные насосы с шаговым электродвигателем (серия OME). В конструкции этого типа насосов шток, движущий мембрану, другим концом крепится на эксцентрик с кулачковой передачей.

При постоянной работе шагового двигателя появляется возможность увеличить продолжительность цикла дозированной подачи настолько, что она будет значительно превышать продолжительность цикла всасывания, так что подача дозируемого вещества может осуществляться почти непрерывно. При сочетании этого механизма с цифровым управлением удастся добиться большой глубины регулировки и высокой точности дозирования. Насосы серии OME позволяют обеспечить дозирование в диапазоне производительности от 0,002 л/ч (OME 2-18) до 48 л/ч (OME 48-3) при максимальном давлении 18 и 3 бар соответственно. При этом диапазон регулирования для всех моделей серии 1–1000.

Значительно большей производительности позволяют достичь механические мембранные насосы, оснащенные асинхронным двигателем: до нескольких кубометров в час, а давления до 100 бар. Возможность



Рис. 6.2. Комбинированный блок для регулирования значения pH и содержания активного хлора в воде

регулировки их производительности значительно меньше, чем у электромагнитных.

В зависимости от дозируемой среды (ее агрессивности, вязкости и пр.) выбирается материал дозирующей головки, мембраны (ПП, ПВХ, тефлон, нержавеющая сталь и др.), обратных клапанов всасывания и нагнетания. Благодаря этому возможно дозирование водных растворов таких веществ, как кислоты (соляная до 30%, серная до 40%), перекись водорода (до 30%), едкий натр (до 40%) и др.

### 6.1. Мембранные насосы с пневматическим приводом

Насосы с пневматическим приводом – пульсационные насосы – разработаны в 60–80 гг. в России во ФГУП ВНИИНМ [213]. Они используются в целом ряде производств для дозированной перекачки особо агрессивных, токсичных и радиоактивных растворов. Рабочим (движущимся) телом является сжатый воздух, непосредственно контактирующий с рабочим раствором. По конструкции такие насосы похожи на клапанные поршневые, в которых роль поршня выполняет сжатый воздух. Изменяя частоту подачи и выпуска воздуха, а также амплитуду колебаний, можно регулировать производительность в широких пределах.

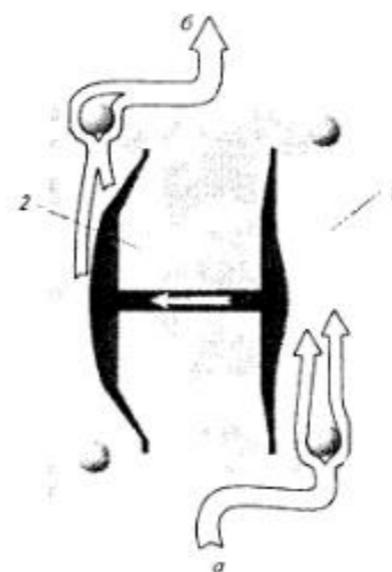


Рис. 6.3. Схема пневматического пульсационного дозирующего насоса:

1 – рабочая камера, 2 – воздушная камера;  
а – всасывание, б – нагнетание

Разработка износостойчивых мембран позволила создать насосы следующего поколения, в которых воздух приводит в движение жидкость через эластичную мембрану. Для создания практически непрерывного потока жидкости насос имеет две рабочие камеры, мембраны которых соединены друг с другом (рис. 6.3). Каждая рабочая камера снабжена клапанами на всасывающей и напорной линиях. С другой стороны мембраны расположена воздушная камера, причем воздушные камеры мембран герметично разделены. При подаче сжатого воздуха в левую воздушную камеру, жидкость из левой рабочей камеры вытесняется в напорный трубопровод. Давление жидкости равно давлению сжатого воздуха. Одновременно левая мембрана тянет правую влево, из правой воздушной полости воздух вытесняется в атмосферу, а в рабочую зону засасывается

новая порция раствора. Затем воздух подается в правую камеру и цикл повторяется. Изменяя частоту импульсов, достаточно четко регулируют производительность. Аналогичные насосы разработаны и за рубежом.

К сожалению, ВНИИНМ выпускает такие насосы малыми партиями по заказу, а западные фирмы производят их серийно, причем из самых разных материалов и с широким диапазоном по производительности. Например, фирма Tarflo выпускает насосы с производительностью до 400 л в минуту из алюминия, нержавеющей стали, различных пластиков [301]. Последние могут работать с глубоко обессоленной водой и с любыми кислотами и щелочами.

## 6.2. Перистальтические насосы

Принцип действия перистальтического насоса понятен из рисунка 6.4. В корпусе укреплена U-образная трубка или шланг из материала с высокой износостойкостью. На вращающемся валу расположена планшайба с 2 или 3 обжимными роликами (башмаками). Их расстояние до стенки камеры насоса равно толщине трубки в сплюсненном состоянии. При вращении вала обжимные ролики полностью пережимают трубку и перемещают содержащуюся в ней жидкость от всасывающей патрубка к нагнетательному. Регулируя скорость вращения, можно плавно изменять производительность насоса. Ступенчатое изменение производится при замене трубки на другой диаметр.

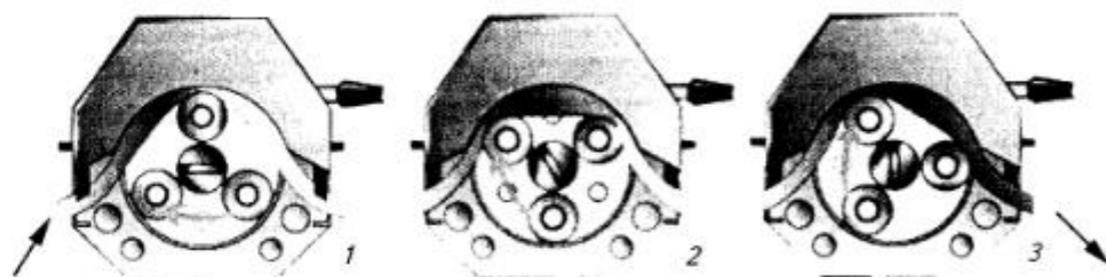


Рис. 6.4. Фазы работы перистальтического насоса

Поскольку трубка всегда пережата как минимум в 1 сечении, обратный поток жидкости невозможен и отпадает необходимость в обратных клапанах. Такие насосы сами засасывают жидкость из расходных емкостей. При установке на одной оси насоса нескольких дозирующих головок обеспечивается подача всех необходимых реагентов.

Перистальтические насосы обеспечивают наиболее равномерную подачу жидкости. Отсутствие непосредственного контакта жидкости с движущимися частями обеспечивает ее стерильность. Химическая стойкость определяется только стойкостью материала трубки.

К недостаткам перистальтических насосов относится относительно низкое давление – до 1,75 атм для стандартных насосов – и недостаточная надежность трубок.

Существуют перистальтические насосы и с большим рабочим давлением, но их стоимость выше. НПП «Экотехника» выпускает шланговые насосы большой производительности 1,4–30 м<sup>3</sup>/ч, рассчитанные на давление до 15 атм.

Некоторые характеристики различных типов дозирующих насосов, присутствующих на российском рынке, приведены в таблице 6.1 [299].

### 6.1. Характеристики дозирующих насосов

Марка	Компания-производитель	Производительность* (л/ч)	Максимальный напор (бар)	Диапазон дозирования (л/ч)	Максимальная частота хода (ход/мин)
<b>Электромагнитные мембранные насосы</b>					
Genodos D, DM	Grunbeck	8,8 (при 6 бар)	10	–	109
Exaflos EK/ES	Grunbeck	1/2 <sub>21</sub>	10	30–3000	–
Bt4a 1000	Prominent	0,69	10	–	180
Bt4a 1601	Prominent	1,10	16	–	180
Bt4a 1602	Prominent	2,20	16	–	180
Bt4a 1005	Prominent	5,00	10	–	180
Bt4a 0708	Prominent	7,70	7	–	180
Bt4a 0413	Prominent	13,00	4	–	180
Bt4a 0220	Prominent	20,40	2	–	180
Bt5a 1605	Prominent	4,70	16	–	180
Bt5a	Prominent	7,80	10	–	180
Bt5a	Prominent	12,30	7	–	180
Bt5a	Prominent	18,00	4	–	180
Bt5a	Prominent	31,80	2	–	180

<sup>1)</sup> Насосы комплектуются стандартными емкостями (3 л) и настроены на производительность 100 мл/м<sup>3</sup>.

<sup>2)</sup> Насосы комплектуются транспортными канистрами (10 л) и настроены на производительность 100 мл/м<sup>3</sup>.

Марка	Компания-производитель	Производительность* (л/ч)	Максимальный напор (бар)	Диапазон дозирования (л/ч)	Максимальная частота хода (ход/мин)
1	2	3	4	5	6
<b>Мембранные (диафрагменные) насосы с шаговым двигателем</b>					
DME 2	Grundfos	2,5	18,0	0,0025–2,5	180
DME 8	Grundfos	7,5	10,0	0,0075–7,5	180

Продолжение таблицы 6.1.

1	2	3	4	5	6
DME 12	Grundfos	12.0	6.0	0.012–12.0	180
DME 19	Grundfos	18.5	6.2	0.025–18.5	151
DME 48	Grundfos	48.0	2.6	0.06–48.0	151
MEDO II/II 6C	BWT	6.0	10.0	0.004–6.0	–
MEDO II/II 12C	BWT	12.0	5.0	0.5–12.0	–

**Механические мембранные дозировочные насосы**

DMM 4	Grundfos	4.0	10	–	26
DMM 8	Grundfos	7.5	10	–	48
DMM 15	Grundfos	15	10	–	95
DMM 23	Grundfos	23	10	–	142
DMM 48	Grundfos	48	10	–	95
DMM 72	Grundfos	72	10	–	142
DMM 110	Grundfos	110	5	–	–
DMM 155	Grundfos	155	4	–	142
DMM 160	Grundfos	160	10	–	71
DMM 210	Grundfos	210	10	–	95
DMM 260	Grundfos	260	10	–	120
DMM 290	Grundfos	290	8	–	95
DMM 390	Grundfos	390	6	–	120
DMM 440	Grundfos	440	5	–	47
DMM 640	Grundfos	640	5	–	70
DMM 990	Grundfos	990	4	–	101
Sigma S3Ba 120145 PVT/SST	Prominent	145	10/12	–	72
Sigma S3Ba 120190 PVT/SST	Prominent	190	10/12	–	103
Sigma S3Ba 120270 PVT/SST	Prominent	270	10/12	–	144
Sigma S3Ba 120330 PVT/SST	Prominent	330	10/12	–	180
Sigma S3Ba 070410 PVT/SST	Prominent	410	7	–	72
Sigma S3Ba 070580 PVT/SST	Prominent	580	7	–	103
Sigma S3Ba 040830 PVT/SST	Prominent	830	4	–	144
Sigma S3Ba 041030 PVT/SST	Prominent	1030	4	–	180
Makro/5 5/20 HM 09 4000	Prominent	4000	4	–	156

**Механические мембранные дозировочные насосы с гидравлическим приводом диафрагмы (гидравлические мембранные)**

Makro/5 5 HMH 23 60-50 S	Prominent	450	25	–	60
Makro/5 5 HMH 19 60-50 S	Prominent	562	25	–	75
Makro/5 5 HMH 14 60-50 S	Prominent	772	25	–	103
Makro/5 5 HMH 11 60-50 S	Prominent	997	25	–	133
Makro/5 5 HMH 09 60-50 S	Prominent	1170	25	–	156
Makro/5 5 HMH 130-150	Prominent	6000	6	–	156
Maxgro	HuXoOyl	100	28	–	–

\* Производительность везде указана при максимальном противодавлении

Продолжение таблицы 6.1.

**Поршневые и плунжерные дозировочные насосы**

Марка	Компания-производитель	Производительность* (л/ч)	Максимальный напор (бар)	Максимальная частота хода (хол/мин)	Мощность привода (кВт)
Серии: НД, НДР, НДЭ	ЗАО «ДНС»	0.4–6300*	2.5–400	–	0.25–5.5
Серии: НДГ, НДГР, НДГЭ	ЗАО «ДНС»	1.6–4000**	2.5–100	–	0.25–5.5
Makro/5 5/50 НК 09-17 S	Prominent	100	320	156	–
Makro/5 5/50 НК 09-17 S	Prominent	2269	6	60	–
Makro/5 5/50 НК	Prominent	2837	6	75	–
Makro/5 5/50 НК	Prominent	3896	6	103	–
Makro/5 5/50 НК	Prominent	5031	6	133	–
Makro/5 5/50 НК	Prominent	6000	6	156	–

\* Производительность при максимальном противодавлении

\*\*Более 120 моделей

## Приложения

### 1. О расчете аппаратурно-технологических схем и аппаратов систем водоподготовки

Разработкой методов расчета и оптимизации аппаратурно-технологических схем и оборудования очистки воды занимались много десятилетий. Учитывая, что состав загрязнений в воде, а также типаж используемого оборудования во всем мире близки, то близки и методы подбора и расчета оборудования.

Поскольку методики выбора, расчета и оптимизации схем и оборудования достаточно сложны и объемны, в данном обзоре даются только ссылки на работы, в которых они представлены.

Методики расчета установок водоподготовки и их узлов подробно описаны в базовых трудах отечественных авторов [1–8]. В настоящее время ведущими организациями, прежде всего учебными, разработаны и предлагаются компьютерные модели основных технологических процессов и методик их расчета. Так, МХТИ [41, 42] предлагает программу расчета установок, ориентируясь в основном на мембранные процессы. Программы МЭИ [43, 44] затрагивают более широкий круг процессов.

Все фирмы, которые производят ионообменные смолы и мембранное оборудование, обеспечивают своих потребителей поддержкой в виде программ выбора и расчета основных аппаратов и технологических схем [104, 110, 111, 198–201]. Это резко упрощает и ускоряет принятие решения. Имеется возможность оперативно просчитать несколько вариантов и выбрать оптимальный.

Несмотря на такую помощь, окончательный выбор, разработка конструкции узлов установок и нестандартных аппаратов, системы КИПиА, конструкторской документации и ответственность за их правильность лежит на изготовителе всего комплекса системы очистки.

### 2. Тезаурус

В настоящее время в различных публикациях стали использоваться термины и понятия, не соответствующие принятым в отечественной химии, химической промышленности, энергетике, водоподготовке. Часто используются термины, являющиеся прямым переводом из зарубежных источников, такие как «карбонный фильтр», «сидиментационный фильтр», «стейджер» (?), «стояк дистрибьютора» (!), «солевой фидер» и т. п. Это объясняется тем, что проблемой занялись люди, ранее не имевшие опыта работы в данной области. В связи с этим составлен словарь терминов, представленный ниже. Использованы отечественные базовые труды [1–18] и работы [303, 304].

Словарь терминов, используемых в водоподготовке.

**Адсорбция** – поглощение молекул растворенного вещества твердым нерастворимым телом – *адсорбентом*.

**Адсорбенты** – твердые нерастворимые тела, обладающие развитой поверхностью (до  $1000 \text{ м}^2/\text{г}$ ) за счет их высокой пористости.

**Активные (активированные) угли** – пористые углеродные тела, зерновые или порошкообразные, с развитой системой микро-, мезо- и макропор, имеющие большую площадь поверхности.

**Амфолиты** – иониты с закрепленными катионообменными и анионообменными группами, которые в определенных условиях выступают либо как катионит, либо как анионит.

**Аниониты** – иониты с закрепленными катионами или катионообменными группами, обменивающиеся с внешней средой анионами.

**Аппараты непрерывного действия** характеризуются тем, что в них непрерывно параллельно или противотоком движутся раствор и ионит.

**Аппараты периодического действия** характеризуются тем, что все технологические процессы (очистка, взрыхление, регенерация, отмывка) проводятся в одном аппарате.

**Водоподготовка** – комплекс операций подготовки воды для ее использования в определенных целях.

**Деионизация** – удаление из воды всех ионов солей.

**Дехлорирование** – удаление из воды растворенного активного молекулярного хлора.

**Дренажная система** – устройство, обеспечивающее равномерные по сечению отвод жидкости из аппарата или ее подачу при исключении выноса загрузки.

**Иониты** – твердые нерастворимые вещества, имеющие в своем составе функциональные (ионогенные) группы, способные к ионизации в растворах и обмену ионами с электролитами.

**Ионный обмен** – процесс обмена ионов твердой матрицы – *ионита* – с ионами раствора.

**Ионообменное оборудование** – аппараты и установки для контактирования ионитов с водой и регенерационными растворами.

**Катиониты** – иониты с закрепленными анионами или анионообменными группами, обменивающиеся с внешней средой катионами.

**Катионитный, анионитный фильтр** – фильтр с загрузкой катионитом или анионитом.

**Коагуляция** – образование и осаждение в жидкой фазе гидроксидов железа или алюминия с адсорбированными на них коллоидами загрязнений и соосаженными гидроксидами тяжелых металлов.

**Кондиционирование** – доведение состава воды до заданных норм, как правило, путем введения соответствующих реагентов.

**Контактная коагуляция** – образование и осаждение гидроксидов железа или алюминия на поверхности частиц, через которые фильтруется раствор с введенными реагентами.

**Корпус аппарата** – оболочка, несущая статические нагрузки и внутреннее давление.

**Макрофильтрация** – механическая фильтрация с удалением крупных видимых твердых частиц размером 1–100 мкм.

**Мембранные процессы** – процессы пропускания жидкости через пористую непрерывную среду (мембрану) с отверстиями определенного размера.

**Микрофильтрация** – удаляет мелкие взвеси и коллоидные частицы, микроорганизмы (бактерии) размером 0,1–1,0 мкм, определяемые как мутность или опалесценция раствора.

**Нанофильтрация** – удаляет молекулы и многозарядные ионы, имеющие размер от 0,001 до 0,01 мкм, органические молекулы с молекулярной массой выше 300 и все вирусы.

**Неорганические иониты** – иониты с матрицей из неорганических соединений.

**Обессоливание** – удаление из воды всех макро- и микрокомпонентов.

**Обратный осмос** – характеризуется использованием мембран с размером пор, соизмеримым с размером одиночных ионов, поэтому извлекаются все растворенные ионы и органические молекулы.

**Органические иониты** – иониты с матрицей из органических (полимерных) материалов.

**Осадительные методы очистки** характеризуются образованием за счет введения специальных реагентов малорастворимой твердой фазы, на поверхности или внутри которой задерживаются коллоидные и (или) растворенные загрязнения.

**Очистка воды** – извлечение определенных загрязнений до заданных норм, например, очистка воды от железа, органики. Обычно применяется очистка сточных вод.

**Опреснение** – уменьшение солесодержания высокосолевых вод (морских, солоноватых) до уровня питьевой.

**Противоточный фильтр** – фильтр, в котором очищаемая вода и регенерационный раствор пропускаются в противоположных направлениях.

**Прямоточный фильтр** – фильтр, в котором очищаемая вода и регенерационный раствор пропускаются в одном направлении.

**Распределительная система** – устройство, обеспечивающее равномерную подачу по сечению аппарата жидкости или газа.

**Селективные иониты** – иониты имеющие высокое сродство к какому-то одному, или к группе ионов, или к определенным радионуклидам.

**Солерастворитель** – устройство для приготовления раствора соли для регенерации фильтра.

**Соосаждение** – включение в состав образующейся малорастворимой твердой кристаллической фазы ионов, близких по характеристикам к тем, которые образуют осадок.

**Сорбция на осадках.** Некоторые кристаллические осадки, особенно в свежесоосажденном состоянии, обладают сорбционными свойствами к определенным ионам.

**Технологические схемы очистки ионным обменом** – набор аппаратов и операций по очистке и регенерации ионитов.

**Термический метод** (дистилляция, выпарка) – способ отделения воды от солей путем ее последовательного испарения и конденсации.

**Ультрафильтрация** извлекает из воды коллоидные частицы, микроорганизмы (бактерии и вирусы), крупные органические макромолекулы, определяющие цветность воды, имеющие размер 0,01–0,1 мкм и молекулярную массу более 1000.

**Умягчение** – процесс извлечения из воды солей жесткости (Ca и Mg).

**Установки непрерывного действия** характеризуются тем, что все технологические процессы проводятся каждый в своем, оптимизированном для данного процесса, аппарате.

**Установки периодического действия** характеризуются тем, что все технологические процессы проводятся последовательно в одном аппарате.

**Физическая сорбция** – поглощение растворенного вещества за счет сил межмолекулярного взаимодействия.

**Фильтрация** – процесс пропускания жидкости через пористую среду с отверстиями определенного размера.

**Фильтр непрерывного действия** – аппарат, в разных секция которого одновременно проводятся фильтрация, регенерация и отмывка загрузки.

**Фильтр периодического действия** – аппарат, в котором последовательно проводятся фильтрация, регенерация и отмывка загрузки.

**Фильтры ионообменные** – аппараты со сплошным слоем ионитов.

**Фильтры с активным углем** (угольные, сорбционные фильтры; неправильно: карбоновые фильтры) – аппараты со сплошным слоем угля.

**Фильтр смешанного действия ФСД** – фильтр, загруженный смесью катионита и анионита.

**Фильтр с зернистой загрузкой** (насыпной, часто – механический, фильтр; неправильно: седиментационный) – аппарат со слоем гранулированного материала и распределительными системами.

**Фильтр с плавающей загрузкой** – фильтр с загрузкой, имеющей плотность много ниже, чем у воды.

**Флокуляция** – процесс агрегации частиц, основанный на их взаимодействии с молекулами высокомолекулярного вещества, которое называют флокулянт.

**Хемосорбция** – поглощение растворенного вещества с образованием химических соединений на поверхности твердого тела с участием химических реакций.

**Химическое осаждение** – образование и осаждение в жидкой фазе малорастворимых кристаллических осадков с соосажденными ионами загрязнений.

### 3. Состав вод рек РФ и СНГ

Источник	Место отбора пробы	Содержание ионов и окислов, мг/кг											Жесткость, мг-экв/л		
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SiO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Взвешенные вещества, мг/кг	Сухой остаток, мг/кг	Окисляемость, мг O <sub>2</sub> /кг	Ж <sub>с</sub>	Ж <sub>св</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<b>Реки</b>															
Амударья	г. Керки	90,2	15,2	118,6	190,4	202,7	126,9	-	10,0	-	4970	-	-	5,76	3,12
Амур	г. Хабаровск	13,4	2,5	-	42,7	4,2	3,0	-	9,0	6,8	35,0	66,0	2,8	0,87	0,7
Ангара	г. Ангарск	16,5	4,3	4,3	67,6	7,0	2,2	-	-	0,7	17,0	116,0	2,6-6,7	1,18	1,11
Волга	г. Ярославль	34,4	9,1	2,2	119,0	23,1	5,8	-	8,7	0,8	13,0	167,6	14,2	2,5	1,95
Волга	г. Казань	14,5	14,5	18,3	140,3	140	15,0	-	3,0	0,0	10,0	360,0	11,2	4,8	2,3
Волхов	г. Новгород	23,7	3,5	6,2	73,2	6,7	14,0	0,3	13,7	1,26	-	-	25,3	1,47	1,2
Воронеж	г. Липецк	72,2	17,4	12,5	280,6	33,5	10,0	-	21,6	-	-	320,4	-	5,1	4,6
Даугава	г. Даугавпилс	42,7	13,1	4,0	183	12,6	3,7	0,3	13,0	50,0	50,0	-	12,5	3,2	3,0
Сев. Двина	г. Архангельск	102,0	16,8	6,9	264	93,2	7,1	-	10,2	-	-	-	8,5	6,48	4,34
Десна	г. Чернигов	68,7	10,3	6,1	250,8	15	4,9	-	-	0,06	14,0	-	5,3	4,29	4,1
Днепр	г. Запорожье	51,9	15,0	8,6	188	29,7	15,8	2,4	4,0	4,4	-	315,0	10,2	3,82	3,08
Дон	г. Задонск	53,9	29,4	19,6	293,5	48,2	5,0	-	-	-	-	-	5,8	5,1	4,81
Сев. Донец	г. Лисичанск	84,0	7,3	10,8	195,2	48	38,0	-	22,0	0,1	-	-	-	4,8	3,2
Енисей	г. Красноярск	37,0	9,1	-	140	10,1	3,2	-	11,4	3,9	2,6	154,4	1,0	2,6	3,3
Иртыш	г. Омск	28,1	17,0	36,1	165	31,7	34,0	3,0	5,7	-	172,4	344,4	14,8	2,8	2,7
Кама	г. Березники	90,0	8,5	240,0	134,4	50,4	440,0	-	9,7	-	155,0	1098,0	11,8	5,2	2,2
Клязьма	г. Владимир	47,0	10,3	25,1	158,7	52,7	21,0	1,2	16,6	12,0	8,0	347,0	9,0	3,2	2,6
Кура	г. Али-Байрамлы	60,0	53,0	161,0	232	197	214,0	26,0	20,0	-	300,0	884,0	5,5	7,36	3,8
Лена	-	47,2	13,4	81,3	147,5	61,9	116,6	-	-	-	-	474,0	-	3,46	2,42

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Лопань	г. Харьков	167,0	30,6	67,6	400	282	47,0	-	4,1	-	-	874,0	-	10,7	6,6
Миасс	г. Челябинск	56,0	22,8	39,6	85,5	214	19,0	-	6,0	30,5	44,0	470,6	8,6	4,67	1,4
Москва	г. Москва	60,0	15,8	-	201	13,5	25,5	-	10,0	0,4	-	-	8,3	4,3	3,3
Нарва	г. Нарва	24,3	11,2	4,6	115	14	4,6	-	-	-	-	166,	-	2,14	1,9
Нева	г. С.-Петербург	9,0	1,2	2,7	26,2	6,1	3,9	-	5,9	0,3	-	67,2	7,6	0,55	0,43
Неман	г. Каунас	56,4	16,8	10,4	250,1	8,9	13,0	0,1	2,2	0,5	18,0	-	5,0	4,2	4,1
Обь	г. Новосибирск	49,2	9,4	0,7	74,0	91,2	5,2	0,1	12,5	0,1	405,0	206,0	2,9	3,23	1,21
Ока	г. Н. Новгород	91,8	16,8	7,8	244	81	22,0	-	17,8	0,4	62,4	438,0	13,6	5,97	4,0
Печора	г. Усть-Цельма	12,2	3,5	2,6	47	5,8	4,0	-	7,6	0,5	-	-	16,0	0,9	0,78
Тобол	г. Кустанай	93,0	43,5	243,1	228,2	294,6	300,7	-	-	-	18,0	-	-	8,22	3,75
Томь	г. Кемерово	23,4	5,2	-	58,3	20,5	8,8	-	19,2	10,5	753	151,2	5,8	1,6	0,96
Урал	г. Гурьев	108,2	9,7	107,3	234,2	107	170,0	-	9,1	-	34,0	769,6	5,2	6,2	3,84
Цна	г. Тамбов	100,0	23,1	20,3	275	95	40,0	10,0	28,0	0,6	25,0	584,0	5,7	6,9	4,5
Шексна	г. Череповец	61,6	15,8	2,3	128,1	97,7	2,4	-	6,7	0,5	10,4	296,4	12,1	4,1	2,1
<b>Водохранилища</b>															
Исаковское	г. Коммунарск	110,0	48,6	154	244	488	67,0	6,0	2,1	0,1	-	1066	3,6	9,5	4,0
Луганское	п. Мироновский	102,2	71,6	215	225,7	528	201,0	0,3	7,7	0,2	-	1464	7,6	11,0	4,1
Терновское	г. Курахово	240,0	170,6	668	213	151,0	684,0	-	2,7	-	-	3483	4,5	26,1	3,5
<b>Пруды</b>															
Несветай	г. Красный Сулин	84,1	50,5	246	201	646	82,0	-	5,6	-	-	1380	24,0	8,35	3,3
<b>ГЭС</b>															
Черепетская	г. Суворов	56,9	6,0	5,1	164,5	35,3	4,5	-	6,3	-	-	212,0	4,9	3,34	2,7
<b>Озера</b>															
Байкал	-	21,3	4,3	0,3	68,3	6,4	3,5	-	-	-	-	-	-	1,43	1,12
Балхаш	-	38,7	106	331	194	572	345,0	-	10,1	-	-	1775	-	10,7	3,17
<b>Моря</b>															
Черное	-	246	648	5530	81	1305	9626	-	-	-	-	17000	-	65,6	-
Каспийское	-	381	764	3274	105	3013	5407	-	-	-	-	13000	-	66,5	-
Океан	-	418	1329	11030	146	2767	19833	-	-	-	-	36000	-	31,3	-

#### 4. Преобразование английских и метрических единиц

В связи с появлением на рынке большого количества материалов и оборудования, технические характеристики которых приводятся в различных единицах, составлена таблица английских, американских и метрических единиц, широко используемых в водоподготовке, с коэффициентами их преобразования.

##### Длина

1 дюйм (inch, in) = 0,083 foot = 25,4 мм.

1 фут (foot, feet, ft.) = 12 inch = 0,305 м.

1 метр = 3,28 фута = 39,37 дюйма.

##### Площадь

1 кв. фут (ft<sup>2</sup>) = 144 кв. дюйм (sq. inch = in<sup>2</sup>) = 0,093 м<sup>2</sup>.

1 кв. дюйм (sq. inch) = 6,45 см<sup>2</sup>.

##### Объем

Унция (жидкая) = 29,6 см<sup>3</sup>, мл

1 галлон H<sub>2</sub>O (US Gallon) = 231 куб. дюйм (Cubic Inch = inch<sup>3</sup>) = 0,83 British Imp. Gallon = 3,79 л

1 куб. фут (Cubic Foot) = 7,48 галлонов = 28,32 л (воды 62,4 фунта)

1 м<sup>3</sup> = 35,31 куб. фут = 264,2 US галл = 220 British Imp. Gallon.

##### Вес

1 Фунт (Pound, lb) = 7000 гран (Grains, grs) = 453,6 г

##### Плотность

1 Pound/cu. Ft (lbs/ft<sup>3</sup>) = 0,134 Pound/Gal (US) = 0,160 Pound/Gal (Imp) = 16 г/л.

##### Расход жидкости, производительность

1 US Gallon per min. (US gpm = US GPM) = 0,227 м<sup>3</sup>/ч = 0,0631 л/с.

1 ft<sup>3</sup>/s = 449 гал/мин = 1,7 м<sup>3</sup>/мин = 2450 м<sup>3</sup>/сутки.

1 м<sup>3</sup>/ч = 4,4 US гал/мин = 0,0098 ft<sup>3</sup>/s = 0,278 л/с.

1 куб. фут/с = 449 гал/мин = 1,7 м<sup>3</sup>/мин = 2450 м<sup>3</sup>/сутки.

1 л/с = 15,9 гал/мин

##### Удельная производительность, скорость

US gpm/ft<sup>2</sup> = 40,6 л/мин м<sup>2</sup> = 2,45 м/ч = м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> ч.

US gpm/ft<sup>3</sup> = 8,02 объемов/ч (Bed Volume/hr, BV/hr).

1 Bed Volume/min = 7,48 Gal. (US)/cu. Ft. min. = 6,24 Gal. (Imp.)/cu. Ft. min.

1 Ft. min = 62,4 Pounds H<sub>2</sub>O/cu. Ft. min.

1 ft/s = 0,305 м/с

##### Давление

1 кг/см<sup>2</sup> = атм = бар = 14,22 lb/ft<sup>2</sup> = PSI = 32,8 Feet water.

1 PSI = lb/ft<sup>2</sup> = 0,07 бар.

#### Концентрация

1 мг/л = 0,0583 Grains /US Gallon (grs/US gal) = 0,07 Grains British Imp. Gallon = 0,4 grains/ Cubic Foot (grs/ft<sup>3</sup>).

1 Pound/cu. Ft (lbs/ft<sup>3</sup>) = 16 г/л.

#### Емкость ионитов

1 Kgrs/ft<sup>3</sup> (as CaCO<sub>3</sub>) = 0,0458 lb/ft<sup>3</sup> = 2290 мг/л = 45,7 мг-экв (по CaCO<sub>3</sub>)/л.

1 мг-экв/л (meq/l) = 62,4 lb-equiv/ ft<sup>3</sup> = 21,9 Kgrs/ft<sup>3</sup> (as CaCO<sub>3</sub>) = 50 г CaCO<sub>3</sub>/л

#### Мощность

1 КВт = 1,341 лошадиной силы.

### 5. Данные по веществам, входящим в состав воды и используемым для ее очистки

Наименование	Формула	Ионный вес	Эквивалентный вес
1	2	3	4
<b>КАТИОНЫ</b>			
Алюминий	Al <sup>3+</sup>	27,0	9,0
Аммиак	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	18,0	18,0
Кальций	Ca <sup>2+</sup>	40,1	20,0
Водород	H <sup>+</sup>	1,0	1,0
Двухвалентное железо	Fe <sup>2+</sup>	55,8	27,9
Трехвалентное железо	Fe <sup>3+</sup>	55,8	18,6
Магний	Mg <sup>2+</sup>	24,3	12,2
Марганец	Mn <sup>2+</sup>	54,9	27,5
Калий	K <sup>+</sup>	39,1	39,1
Натрий	Na <sup>+</sup>	23,0	23,0
Одновалентная медь	Cu <sup>+</sup>	63,6	63,6
Двухвалентная медь	Cu <sup>2+</sup>	63,6	31,8
<b>АНИОНЫ</b>			
Бикарбонат	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61,0	61,0
Карбонат	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	60,0	30,0
Хлорид	Cl <sup>-</sup>	35,5	35,5
Фторид	F <sup>-</sup>	19,0	19,0
Нитрат	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	62,0	62,0
Гидроксид	OH <sup>-</sup>	17,0	17,0
Фосфат (трехосновный)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	95,0	31,7
Фосфат (двухосновный)	HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	96,0	48,0
Фосфат (одноосновный)	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	97,0	97,0
Сульфат	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	96,1	48,0
Сульфит	SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	80,1	40,0
<b>СОЕДИНЕНИЯ</b>			
Гидроксид алюминия	Al(OH) <sub>3</sub>	78,0	26,0
Сульфат алюминия	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	342,1	57,0
Оксид алюминия	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	102,0	17,0
Алюминат натрия	Na <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	164,0	27,3
Бикарбонат кальция	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	162,1	81,1
Карбонат кальция	CaCO <sub>3</sub>	100,1	50,1
Хлорид кальция	CaCl <sub>2</sub>	111,0	55,5
Гидроксид кальция (чистый)	Ca(OH) <sub>2</sub>	74,1	37,1
Гидроксид кальция (90%)	Ca(OH) <sub>2</sub>	-	41,1
Сульфат кальция (безводный)	CaSO <sub>4</sub>	136,2	68,1
Сульфат кальция (гипс)	CaSO <sub>4</sub> × 2H <sub>2</sub> O	172,2	86,1
Фосфат кальция	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	310,3	51,7

## Продолжение приложения 5

1	2	3	4
Динатрий фосфат	$\text{Na}_2\text{HPO}_4 \times 12\text{H}_2\text{O}$	358,2	119,4
Динатрий фосфат (безводный)	$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	142,0	47,3
Оксид железа	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	159,6	26,6
Оксид железа (магнитный)	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	231,6	—
Сульфат железа (купорос)	$\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	278,0	139,0
Оксид магния	$\text{MgO}$	40,3	20,2
Бикарбонат магния	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	146,3	73,2
Карбонат магния	$\text{MgCO}_3$	84,3	42,2
Хлорид магния	$\text{MgCl}_2$	95,2	47,6
Гидроксид магния	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	58,3	29,2
Фосфат магния	$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$	263,0	43,8
Сульфат магния	$\text{MgSO}_4$	120,4	60,2
Монофосфат натрия	$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times \text{H}_2\text{O}$	138,1	46,0
Монофосфат натрия (безводный)	$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	120,4	40,0
Метафосфат натрия	$\text{NaPO}_3$	102,0	34,0
Кремнезем	$\text{SiO}_2$	60,1	30,0
Бикарбонат натрия	$\text{NaHCO}_3$	84,0	84,0
Карбонат натрия	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	106,0	53,0
Хлорид натрия	$\text{NaCl}$	58,5	58,5
Гидроксид натрия	$\text{NaOH}$	40,0	40,0
Нитрат натрия	$\text{NaNO}_3$	85,0	85,0
Сульфат натрия	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	142,0	71,0
Сульфит натрия	$\text{Na}_2\text{SO}_3$	126,1	63,0
Тетранатрий ЭДТА	$(\text{CH}_2)_2\text{N}_2(\text{CH}_2\text{COONa})_4$	380,2	95,1
Тринатрийфосфат водный	$\text{Na}_3\text{PO}_4 \times 12 \text{H}_2\text{O}$	380,2	126,7
Тринатрийфосфат (безводный)	$\text{Na}_3\text{PO}_4$	164,0	54,7
Тринатрий NTA	$(\text{CH}_2)_3\text{N}(\text{COONa})_3$	257,1	85,7
<b>ГАЗЫ</b>			
Аммиак	$\text{NH}_3$	17	17
Углекислый газ	$\text{CO}_2$	44	22
Водород	$\text{H}_2$	2	1
Кислород	$\text{O}_2$	32	8
Сернистый газ	$\text{H}_2\text{S}$	34	17
<b>КИСЛОТЫ</b>			
Угольная	$\text{H}_2\text{CO}_3$	62,0	31,0
Соляная	$\text{HCl}$	36,5	36,5
Фосфорная	$\text{H}_3\text{PO}_4$	98,0	32,7
Серная	$\text{H}_2\text{SO}_4$	98,1	49

## 6. Выбор методов очистки в зависимости от качества исходной воды и требований потребителя [40]

Технологическая задача	Удаляемые вещества	Методы решения	Используемое основное оборудование (ИВР)	Используемые химические реагенты и расходные материалы	Используемые фильтрующие материалы
<b>ОСВЕТЛЕНИЕ, ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ И ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЕ ВОДЫ</b>					
Удаление железа, марганца и сероводорода	Железо $\text{Fe}^{2+}$	Аэрация и фильтрование	1. Компрессор или другое устройство для аэрации 2. Осветлительные фильтры (серия CF)	Отсутствуют	Кварцевый песок Дробленый антрацит Катализатор BIRM Катализатор AMDX AJW (кальцит $\text{CaCO}_3$ )
	Железо $\text{Fe}^{3+}$				
Сероводорода	Сероводород $\text{H}_2\text{S}$	Дозирование перманганата калия и фильтрование	1. Насос-дозатор 2. Осветлительные фильтры (серия CF) 3. Емкость для раствора $\text{KMnO}_4$	Перманганат калия $\text{KMnO}_4$	Кварцевый песок Дробленый антрацит Катализатор MTM Катализатор MGS
	Марганец $\text{Mn}^{2+}$ (небольшие количества)				
Осветление и обесцвечивание	Железо $\text{Fe}^{2+}$	Дозирование гипохлорита натрия и фильтрование	1. Насос-дозатор 2. Осветлительные фильтры (серия CF) 3. Емкость для раствора $\text{NaClO}$	Гипохлорит натрия $\text{NaClO}$	Кварцевый песок Дробленый антрацит Катализатор AMDX
	Железо $\text{Fe}^{3+}$				
	Сероводород $\text{H}_2\text{S}$	Фильтрование через зернистые материалы	Осветлительные фильтры (серия CF)	Отсутствуют	Кварцевый песок Дробленый антрацит Материал FAG
	Марганец $\text{Mn}^{2+}$				

1	2	3	4	5	6
	Взвешенные вещества (мутность)	Фильтрование через сменные фильтрующие элементы	1. Мультипатронные фильтры (серия HIF) 2. Патронные фильтры-гидроциклоны (серия HUR)	Сменные фильтрующие элементы (картриджи)	Отсутствуют
	Взвешенные вещества (мутность) Органические вещества (цветность)	Фильтрование через зернистые материалы	1. Насос-дозатор 2. Осветлительные фильтры (серия SF) 3. Емкости для реактивов	1. Коагулянты – соли алюминия и железа 2. Флокулянты-полиэлектролиты 3. Гипохлорит натрия NaClO	Кварцевый песок Дробленый антрацит

**УМЯГЧЕНИЕ ВОДЫ**

Умягчение в одну и две ступени	Ионы кальция $Ca^{2+}$ Ионы магния $Mg^{2+}$	Натрий-катионирование (фильтрование через слой ионообменной смолы в Na-форме)	Катионитные установки периодического и непрерывного действия (серии SF, SF-D, SF-X, SF-A)	Поваренная соль NaCl	Сильнокислотные катиониты: КУ-2-8 Purolite C-100E Dowex HCR(S) Levatit S-100 Amberlite IR-120Na Amberlite SRIL
Умягчение с одновременным удалением железа и марганца	Ионы кальция $Ca^{2+}$ Ионы магния $Mg^{2+}$ Железо $Fe^{2+}$ Марганец $Mn^{2+}$	Натрий-катионирование (фильтрование через слой цеолита в Na-форме)	Катионитные установки периодического и непрерывного действия (серии CR, CR-D, CR-X, CR-A)	Поваренная соль NaCl	Синтетические цеолиты (алюмосиликаты натрия), обладающие катионообменными свойствами: CR-100 и CR-200

1	2	3	4	5	6
<b>КОРРЕКТИРОВКА ЩЕЛОЧНОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ pH ВОДЫ</b>					
Снижение щелочности с одновременным умягчением и снижением величины pH	Бикарбонат-ионы $HCO_3^-$ Карбонат-ионы $CO_3^{2-}$ Ионы кальция $Ca^{2+}$ Ионы магния $Mg^{2+}$ Ионы натрия $Na^+$	Водород-катионирование (фильтрование через слой ионообменной смолы в H-форме) с последующей отдувкой свободной углекислоты	Катионитные установки периодического и непрерывного действия (серии SF, SF-D, SF-X, SF-A)	Соляная кислота HCl	Сильнокислотные катиониты: КУ-2-8 Purolite C-100E Dowex HCR(S) Levatit S-100 Amberlite IR-120H Amberlite SRIL
Снижение щелочности с одновременным снижением величины pH	Бикарбонат-ионы $HCO_3^-$ Карбонат-ионы $CO_3^{2-}$	Непрерывное дозирование кислот с последующей отдувкой свободной углекислоты	1. Насос-дозатор 2. Емкость для реактивов	Соляная кислота HCl Серная кислота $H_2SO_4$ Пищевые кислоты (лимонная и др.)	Отсутствуют Слабокислотные катиониты: Amberlite IRC-86H

**ОБЕССОЛИВАНИЕ ВОДЫ**

Частичное химическое обессоливание	Ионы натрия $Na^+$ Ионы кальция $Ca^{2+}$ Ионы магния $Mg^{2+}$ Хлорид-ионы $Cl^-$ Сульфат-ионы $SO_4^{2-}$ Бикарбонат-ионы $HCO_3^{2-}$ Карбонат-ионы $CO_3^{2-}$	1-я ступень – катионирование (фильтрование через слой катионообменной смолы в H-форме) 2-я ступень – анионирование (фильтрование)	Ионитные установки периодического и непрерывного действия (на основе серий SF, SF-D)	Соляная кислота HCl	Сильнокислотные катиониты: КУ-2-8 Purolite C-100E Dowex HCR(S) Levatit S-100 Amberlite IR-120H Amberlite SRIL
------------------------------------	--	--	--	---------------------	---

1	2	3	4	5	6
	Кремниевая кислота $\text{SiO}_2$	рование через слой анионообменной смолы в OH-форме)		Едкий натр NaOH	Amberlite IRC-86H Сильноосновные аниониты: Purolite A-400 Слабоосновные аниониты: Amberlite IRA-93
Обессоливание физическими методами	Ионы натрия $\text{Na}^+$ Ионы кальция $\text{Ca}^{2+}$ Ионы магния $\text{Mg}^{2+}$ Хлорид-ионы $\text{Cl}^-$ Сульфат-ионы $\text{SO}_4^{2-}$ Бикарбонат-ионы $\text{HCO}_3^-$ Карбонат-ионы $\text{CO}_3^{2-}$ Кремниевая кислота $\text{SiO}_2$	Обратный осмос	Установки обратного осмоса (серии Нептун и Енисей)	Соляная кислота HCl Трилон Б Едкий натр NaOH Додецилсульфат натрия (для периодической промывки мембран)	Тонкопленочные мембраны рулонного типа: Hydranautics Filmtec Osmotics Fluid systems Desal
<b>УДАЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ, УСТРАНЕНИЕ ЗАПАХОВ И ПРИВКУСОВ ВОДЫ</b>					
Удаление органических соединений, устранение привкусов и запахов	Свободный хлор Хлорамины Органические соединения природного происхождения Легкие нефтепродукты	Фильтрование через гранулированный активированный уголь	Осветлительные фильтры (серия CF)	Отсутствуют	Гранулированный активированный уголь марки 207C

1	2	3	4	5	6
Удаление органических соединений	Органические соединения природного и искусственного происхождения	Дозирование окислителя и фильтрование	1. Насос-дозатор 2. Осветлительные фильтры (серия CF) 3. Емкость для раствора окислителя	Гипохлорит натрия NaClO Перманганат калия $\text{KMnO}_4$	Гранулированный активированный уголь марки 207C
<b>СТАБИЛИЗАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ</b>					
Устранение коррозионных свойств по отношению к металлу и бетону	Корректировка значений pH и общей щелочности	Дозирование химических реагентов	1. Насосы-дозаторы 2. Емкости для растворов реагентов	Питьевая вода $\text{NaHCO}_3$ Карбонат натрия $\text{Na}_2\text{CO}_3$ Едкий натр NaOH Гексаметафосфат натрия Триполифосфат натрия	Отсутствуют
Предотвращение образования карбонатных отложений	Корректировка значений pH и общей щелочности	Дозирование химических реагентов	1. Насос-дозатор 2. Емкость для раствора кислоты	Соляная кислота HCl Серная кислота $\text{H}_2\text{SO}_4$ Гексаметафосфат натрия Триполифосфат натрия Лимонная кислота	Отсутствуют
Корректировка содержания иона кальция $\text{Ca}^{2+}$	Частичное умягчение воды натрий-катионированием	Катионитные установки периодического и непрерывного действия (серии)	Поваренная соль NaCl	Сильнокислотные катиониты: КУ-2-8 Purolite C-100E	



ФИЛЬТРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ		Искусственный цеолит Crystal-Right 100				Стандартная катионообменная смола					
Удельные расходы воды*		Фильтрование		Обратная промывка		Фильтрование		Обратная промывка			
Расход воды, галлоны в минуту/кв. фут (gpm/sq. ft)		4,0	8,0	8,0	10,0	2,0	16,0	5,0	7,0		
Соответствующая линейная скорость, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч) или м/ч		10	20	20	24	5	39	12	17		
Параметры фильтра		Диаметр зерен 0,8–1,8 мм				Диаметр зерен 0,31–1,2 мм					
Диаметр, дюймы	Диаметр, мм	Площадь, м <sup>2</sup>		Расчетные расходы воды, м <sup>3</sup> /ч		Расчетные расходы воды, м <sup>3</sup> /ч					
8	208	0,03	0,03	0,3	0,7	0,7	0,8	0,2	1,3	0,4	0,6
10	257	0,05	0,05	0,5	1,0	1,0	1,3	0,3	2,0	0,6	0,9
12	304	0,07	0,07	0,7	1,4	1,4	1,8	0,4	2,8	0,9	1,2
13	333	0,09	0,09	0,8	1,7	1,7	2,1	0,4	3,4	1,1	1,5
14	369	0,11	0,11	1,0	2,1	2,1	2,6	0,5	4,2	1,3	1,8
16	406	0,13	0,13	1,3	2,5	2,5	3,2	0,6	5,1	1,6	2,2
18	469	0,17	0,17	1,7	3,4	3,4	4,2	0,8	6,7	2,1	2,9
21	552	0,24	0,24	2,3	4,7	4,7	5,8	1,2	9,3	2,9	4,1
24	610	0,29	0,29	2,9	5,7	5,7	7,1	1,4	11,4	3,6	5,0
30	770	0,47	0,47	4,5	9,1	9,1	11,4	2,3	18,2	5,7	7,9
36	927	0,67	0,67	6,6	13,2	13,2	16,5	3,3	26,3	8,2	11,5
42	1074	0,91	0,91	8,8	17,7	17,7	22,1	4,4	35,3	11,0	15,5
48	1226	1,18	1,18	11,5	23,0	23,0	28,8	5,8	46,1	14,4	20,2

\* ) Значения удельных расходов приняты на основе СНиП 2-04-02-84 и официальных бюллетеней фирм-производителей

## 8. Условия эксплуатации фильтрующих материалов на основе двуокиси марганца [40]

ФИЛЬТРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ		BIRM				MTM					
Удельные расходы воды*		Фильтрование		Обратная промывка		Фильтрование		Обратная промывка			
Расход воды, галлоны в минуту/кв. фут (gpm/sq. ft)		3,5	5,0	10,0	12,0	3,0	5,0	10,0	12,0		
Соответствующая линейная скорость, м <sup>3</sup> /(м <sup>2</sup> ·ч) или м/ч		8,5	12,2	24,4	29,3	7,3	12,2	24,4	29,3		
Параметры фильтра		Эквивалентный диаметр зерен 0,59 мм				Эквивалентный диаметр зерен 0,6–0,7 мм					
Диаметр, дюймы	Диаметр, мм	Площадь, м <sup>2</sup>		Расчетные расходы воды, м <sup>3</sup> /ч		Расчетные расходы воды, м <sup>3</sup> /ч					
8	208	0,03	0,03	0,4	0,8	0,4	1,0	0,2	0,4	0,8	1,0
10	257	0,05	0,05	0,6	1,3	0,6	1,5	0,4	0,6	1,3	1,5
12	304	0,07	0,07	0,9	1,8	0,9	2,1	0,5	0,9	1,8	2,1
13	333	0,09	0,09	1,1	2,1	1,1	2,5	0,6	1,1	2,1	2,5
14	369	0,11	0,11	1,3	2,6	1,3	3,1	0,8	1,3	2,6	3,1
16	406	0,13	0,13	1,6	3,2	1,6	3,8	0,9	1,6	3,2	3,8
18	469	0,17	0,17	2,1	4,2	2,1	5,1	1,3	2,1	4,2	5,1
21	552	0,24	0,24	2,9	5,8	2,9	7,0	1,8	2,9	5,8	7,0
24	610	0,29	0,29	3,6	7,1	3,6	8,6	2,1	3,6	7,1	8,6
30	770	0,47	0,47	5,7	11,4	5,7	13,6	3,4	5,7	11,4	13,6
36	927	0,67	0,67	8,2	16,5	8,2	19,8	4,9	8,2	16,5	19,8
42	1074	0,91	0,91	11,0	22,1	11,0	26,5	6,6	11,0	22,1	26,5
48	1226	1,18	1,18	14,4	28,8	14,4	34,5	8,6	14,4	28,8	34,5



## Литература

1. А. А. Громогласов и др. Водоподготовка. Процессы и аппараты. – М.: Атомиздат, 1977. – 325 с.
2. Г. И. Николадзе. Обезжелезивание природных и оборотных вод. – М.: Стройиздат, 1978. – 161 с.
3. О. В. Лифшиц. Справочник по водоподготовке котельных установок. – М.: Энергия, 1976. – 288 с.
4. Л. С. Стерман, В. Н. Покровский. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС. – М.: Энергия, 1981. – 232 с.
5. Ю. А. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. В. Коровин. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 252 с.
6. А. А. Громогласов, А. С. Копылов, А. П. Пильщиков. Водоподготовка: Процессы и аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
7. Г. И. Николадзе, М. А. Сомов. Водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1995. – 688 с.
8. Б. Н. Фрог. Водоподготовка. – М.: МГУ, 2001. – 680 с.
9. Современные технологии и оборудование для обработки воды на водоочистных станциях. – Сб. – М.: НИИ КВОВ, 1997. – 112 с.
10. Вода. Технологии и оборудование / НТС Стройинформ. – М.: 2002. – 360 с.
11. Методические рекомендации по обеспечению выполнения требований санитарных правил и норм СанПиН 2.1.4.559–96 / Под. ред. В. Л. Драгинского. – М.: ВИМИ, 2000. – 92 с.
12. В. Т. Мазаев, Т. Г. Шелепина, В. И. Мандрыгин. Контроль качества питьевой воды. – М.: Колос, 1999. – 168 с.
13. В. А. Усольцев и др. Подготовка воды питьевого качества в городе Кемерове – М.: НИИ КВОВ, 1996. – 116 с.
14. Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – 304 с.
15. Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – 236 с.
16. Ю. И. Дыгнерский. Обратный осмос и ультрафильтрация. – М.: Химия, 1978. – 351 с.
17. Ю. И. Дыгнерский. Баромембранные процессы. – М.: Химия, 1986. – 271 с.
18. Ф. Н. Карелин. Обессоливание воды обратным осмосом. – М.: Стройиздат, 1988. – 208 с.
19. Е. Бховец, М. Безруков, Е. Добашина. Комплексное решение вопросов водоподготовки для предприятий ликероводочной промышленности // О напитках. – 2002. – №3. – С. 14–16.
20. Е. Т. Зуев и др. Технология водоподготовки в производстве безалкогольных и слабоалкогольных напитков // Пиво и напитки. – 2003. – №2. – С. 64–65.
21. Б. Е. Рябчиков. Водоподготовка в производстве ликероводочных изделий // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2001. – №2. – С. 30–32.
22. Б. Е. Рябчиков и др. Установка водоподготовки для производства соков // Пиво и напитки. – 2002. – №3. – С. 30–32.
23. Б. Е. Рябчиков и др. Водоподготовка для водочного производства // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2001. – №4. – С. 26–28.
24. Б. Е. Рябчиков и др. Водоподготовка для водочного производства // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2002. – №1. – С. 11–13.
25. Б. Е. Рябчиков и др. Модернизация оборудования для водоподготовки в ликероводочном производстве // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2002. – №2. – С. 11–13.
26. С. М. Эленгорн. Российская водоочистка для ликеро-водочного производства // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №8. С. 4; 2003. – №6. – С. 14.
27. С. М. Эленгорн. Промышленная система водоподготовки производства АОЗТ «МТГ» // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №11. – С. 5.
28. В. А. Лялин, Р. Х. Хамизов. Новые технологии и оборудование для подготовки воды в ликероводочном производстве, Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2003. – №3. – С. 30–32.
29. Вода и водоподготовка, цикл статей // Пиво и напитки. – 2001. – №№2–5.
30. В. Лапшин. Подготовки воды для розлива в емкости // Напитки и технологии. – 2000. – №3. – С. 11.
31. В. Лапшин. Типовые схемы подготовки воды для пивоварения // Напитки и технологии. – 2000. – №4. – С. 12.
32. Г. А. Ермолаева. Вода и ее кондиционирование // Пиво и напитки, – 2000. – №5. – С. 51–55.
33. Б. М. Ларин, Е. Н. Бушуев, Н. В. Бушуева. Технологическое и экологическое совершенствование водоподготовительных установок на ТЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №8. – С. 23–27.
34. Ю. В. Моисеев, В. В. Шищенко. Сокращение водопотребления и водоотведения на ТЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №10. – С. 71–75.
35. А. С. Седлов и др. Техничко-экономическое сравнение схем водоподготовительных установок ПГУ ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №4. – С. 20–24.
36. Б. Н. Дрикер и др. Ресурсосберегающие технологии в водоподготовке промышленных предприятий и теплоэнергетике // Энергосбережение и водоподготовка. – 2001. – №4. – С. 13–17.
37. И. И. Боровкова. Современные технические решения при проектировании водоподготовительных установок ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – №2. – С. 3–8.

38. Б. М. Ларин и др. Анализ существующих технологий водоподготовки на тепловых электростанциях // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – №2. – С. 11–19.
39. Т. Ходжис. Технология получения чистой воды // Чистые помещения и технологические среды. – 2003. – №3. – С. 13–19.
40. ЗАО «Национальные водные ресурсы» / Материалы к семинарам по технологии подготовки воды. – Москва, 16.11.00 и 02.03.01.
41. Н. С. Орлов. Методология разработки комплексных систем очистки жидких технологических сред на основе баромембранных процессов // Диссертация докт. техн. наук. – М., 2000. – 405 с.
42. Н. С. Орлов. Жидкофазные мембранные системы для медицины и биотехнологии / Тез. докл. Применение новейших мембранных технологий в промышленности и экологии. – М.: ВИМИ, 1997 – С. 17–22.
43. В. Ф. Очков, А. П. Пильщиков, Ю. В. Чудова. Открытые расчеты в энергетике на примере водоподготовки // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – №1. – С. 21–28.
44. В. Ф. Очков. Сайт [http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/vpu\\_book](http://twi.mpei.ac.ru/ochkov/vpu_book).
45. Вода питьевая. Индивидуальные средства доочистки / Информационный сборник №4. – М.: ВИНТИ, 1997. – 114 с.
46. Н. В. Миклашевский, С. В. Королькова. Чистая вода. Системы очистки и бытовые фильтры. – СПб.: «Издательская группа «Арлит», 2000. – 240 с.
47. Ю. С. Веселов, И. С. Лавров, Н. И. Рукобратский. Водоочистное оборудование. – Л.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
48. Водоподготовительное оборудование для ТЭС и промышленной энергетики / Отраслевой каталог. ЦНИИформЭнергомаш. – М., 1983. – 260 с.
49. Сайт ЗАО Таганрогский котельный завод ТКЗ «Красный котельщик», [www.tkz.taganrog.ru](http://www.tkz.taganrog.ru).
50. Сайт ЗАО Бийский котельный завод БикЗ, «Бийскэнергомаш», [www.bikz.ru](http://www.bikz.ru), [www.old.kotel.ru](http://www.old.kotel.ru).
51. Я. Е. Резник. О некоторых терминах и единицах измерения величин в водоподготовке // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №3. – С. 90–93; №4. – С. 92–95.
52. И. В. Семенова, А. В. Хорошилов. Химия природной воды // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №1. – С. 85–86.
53. Питьевая вода. СанПиН 2.1.4.1074–01. – М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора, 2002. – 103 с.
54. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99). – М.: Минздрав РФ, 1999. – 115 с.
55. Г. С. Фомин. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам. – М.: Протектор, 2000. – 848 с.
56. Государственный контроль качества воды. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 688 с.
57. Методические указания по надзору за водно-химическим режимом паровых и водогрейных котлов, РД10–165–97. – С-Петер.: ДЕАН, 2001.

58. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. – М.: ПИО ОБТ, 2001.
59. Паровые и водогрейные котлы (эксплуатация и ремонт) – М.: ПИО ОБТ, 2001.
60. Правила техники эксплуатации электрических станций и сетей РФ, РД 34.20.501–95, утв. 11.02.2000 г.
61. В. Л. Кудряшов, В. К. Лапшин. Подготовка воды для питания паровых и водогрейных котлов в пищевой промышленности // Пищевая промышленность. – 2003. – №4. – С. 70–71.
62. Я. Е. Резник. Вода для систем ГВС // Аква-Терм. – 2002. – №1. – С. 42–44.
63. ТР 10–04–03–09–88 «Технологический регламент по производству водки».
64. ТИ 10–5031536–73–10 «Технологическая инструкция по водоподготовке для производства пива и безалкогольных напитков».
65. Сборник основных правил, технологических инструкций и нормативных материалов по производству безалкогольной продукции / Под. Ред Н. Г. Саришвили. – Пищепромиздат, 2000.
66. Я. Резник. Нормативные документы в области водоснабжения и водоподготовки // Аква-Терм. – 2003. – №2. – С. 44–45.
67. С. Н. Гладенов, С. С. Прокуева. Фильтрующие материалы: практика применения // Экология и промышленность России. – 2002. – Ноябрь. – С. 35–38.
68. Е. К. Филипов, О. И. Овечкина, З. К. Липина. Использование двухслойной загрузки в контактных фильтрах // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – №6. – С. 38–39.
69. В. И. Федоренко. Обезжелезивание технологической воды методом многослойного фильтрования // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №8. – С. 6–8.
70. И. В. Алгунова. Эффективность применения горелых пород в качестве загрузки при обезжелезивании воды // ВСТ. – 2003. – №5.1. – С. 21–23.
71. Сайт фирмы Clack, [www.clackcorp.com](http://www.clackcorp.com).
72. Фильтровальное оборудование для очистки воды промышленного и питьевого назначения // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №3. – С. 24.
73. Сайт фирмы Structural, [www.Structural.com](http://www.Structural.com); [www.Pentair.com](http://www.Pentair.com).
74. Сайт фирмы Lorivan, [www.Lorivan.be](http://www.Lorivan.be).
75. Сайт фирмы Fleck, [www.Fleckcontrols.com](http://www.Fleckcontrols.com); [www.Pentair.com](http://www.Pentair.com).
76. М. Г. Журба. Пенополистирольные фильтры. – М.: Стройиздат, 1992. – 162 с.
77. М. С. Покровский, М. Г. Журба. Фильтр для очистки воды / Пат.2142317, 1997.
78. М. Г. Журба. Установка для очистки воды / Пат. РФ №2144005, 1998.
79. Ж. М. Говоркова, М. С. Покровский. Осветлительно-сорбционный фильтр для глубокой очистки воды / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 26–27.

80. Ж. М. Говоркова, М. С. Покровский. Глубокая доочистка воды на осветлительно-сорбционных фильтрах // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №7. – С. 10–12.
81. Г. В. Слепцов, А. Г. Ставицкий, В. О. Орлов. Возможности повышения производительности станций обезжелезивания // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 26–28.
82. Сайт ООО «Аквастройсервис», [www.Akvastroiservis.com](http://www.Akvastroiservis.com).
83. Б. Е. Рябчиков, П. В. Есауленко. Насынные фильтры непрерывного действия для водоочистки и водоподготовки. – М.: ЦНИИЦветметинформации, 1989. – 32 с.
84. Ристо Саарайнен. Контактная очистка в песчаном фильтре непрерывного действия Динасэнд / Экватэк-2002, Материалы для Финляндии 06.06.2002. – С. 34–39.
85. Сайт фирмы «Hyxo Oy», [www.Vodapro.fi](http://www.Vodapro.fi).
86. Сайт фирмы «Astraco Water Engineering», [www.aquabio.co.uk](http://www.aquabio.co.uk).
87. Сайт фирмы «Millipore», [www.Millipore.com](http://www.Millipore.com).
88. Сайт фирмы «Pall», [www.Pall.com](http://www.Pall.com).
89. Сайт ООО «Промфильтр», [www.promfilter.ru](http://www.promfilter.ru).
90. Сайт НПП «Тензор», [www.micro.dubna.ru](http://www.micro.dubna.ru).
91. Сайт НПП «Экспресс-Эко», [www.express-eco.ru](http://www.express-eco.ru).
92. Сайт ЗАО «Фильтр», [www.ftov.ru](http://www.ftov.ru).
93. Сайт ЗАО НТЦ «Владипор», [www.vtsnet.ru/vladipor](http://www.vtsnet.ru/vladipor).
94. Ю. В. Шустов. Применение патронных фильтров при производстве напитков // Ликероводочное производство и виноделие. – 2001. – №11. – С. 6–7.
95. В. Г. Агацкий. В третье тысячелетие – с «Блеском» // Ликероводочное производство и виноделие. – 2002. – №8. – С. 7.
96. В. А. Горохов и др. Микрофильтрационные стерилизуемые установки из коррозионностойких сплавов // Конверсия в машиностроении. – 2002. – №3. – С. 19–23.
97. Г. В. Сакаш. Регенерация керамических элементов патронных фильтров // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №1. – С. 47.
98. Фильтры для очистки воды на трековых мембранах – продукт высоких технологий // СОК. – 2003. – №9. – С. 26–27.
99. Г. Г. Каграманов, Р. Г. Качаров, А. А. Дубровин. Исследование очистки водных растворов от катионов с помощью керамических мембран // Хим. технология. – 2001. – №1. – С. 42–47.
100. В. Давыдов и др. «Вечные» фильтры для очистки воды «Ваше здоровье» // АКВА-ВОКС. – 2003. – №2. – С. 4.
101. В. Давыдов и др. Фильтры для очистки и обеззараживания воды на основе керамических мембран // АКВА-ВОКС. – 2002. – №1. – С. 4–5.
102. А. А. Свитцов. Применение мембранных процессов в технологии переработки жидких радиоактивных отходов // Экология промышленного производства. – 2002. – №1. – С. 32–37.

103. А. А. Свитцов. Мембранные аппараты с плоскими пластинчатыми керамическими мембранами / Решение проблем водоподготовки и водоочистки в промышленности и городском хозяйстве. – М.: ВИМИ, 1998. – С. 27–30.
104. Сайт фирмы «Hydranautics», [www.Membranes.com](http://www.Membranes.com)
105. А. Г. Первов и др. Ультрафильтрация – технология будущего // ВСТ. – 2001. – №9. – С. 9–12.
106. А. П. Андрианов. Получение питьевой воды с помощью мембранного метода ультрафильтрации // Экологические системы и приборы: – 2003. – №4. – С. 15–18.
107. А. П. Андрианов, А. Г. Первов. Оптимизация процессов обработки воды методом ультрафильтрации // ВСТ. – 2003. – №6. – С. 7–11.
108. Г. Н. Герасимов. Адаптация технологии обработки питьевой воды к новым условиям применения ультрафильтрации // ВСТ. – 2003. – №6. – С. 11–18; №7. – С. 21–26.
109. О. И. Монтило и др. Улучшение тактико-технических и экологических показателей установок очистки воды, эксплуатируемых в зонах чрезвычайных экологических ситуаций // Экологические системы и приборы. – 2003. – №11. – С. 16–22.
110. Сайт фирмы «GE Osmonics», [www.Osmonics.com](http://www.Osmonics.com).
111. Сайт фирмы «Dow Chemical», [www.Dow.com](http://www.Dow.com); [www.Filmtec.com](http://www.Filmtec.com).
112. Сайт фирмы «Rochem», [www.Rochem.com](http://www.Rochem.com); [www.Rochem.ru](http://www.Rochem.ru).
113. Я. Е. Резник. Питьевая вода и обратный осмос // Aqua-Терм. – 2001. – Ноябрь. – С. 54–57.
114. Е. П. Агеев. Применение процессов мембранного разделения // Критические технологии. Мембраны. – 2001. – №9. – С. 25–26.
115. Б. Н. Ходырев и др. Проблема удаления природных и техногенных органических веществ из воды на установках обратного осмоса // Теплоэнергетика. – 2001. – №6. – С. 71–76.
116. В. К. Смирнов. Подготовка воды на обратноосмотической установке // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2001. – №3. – С. 22.
117. О. Ф. Парилова. Установки приготовления воды // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №7. – С. 3–5.
118. И. В. Пригун, О. Ф. Парилова. Технология обратного осмоса в подготовке воды для пивоваренной отрасли // Пиво и напитки. – 2001. – №2. – С. 40–42.
119. И. В. Пригун. Системы обратного осмотического обессоливания для водоподготовки ликероводочных производств, Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2002. – №3. – С. 20–21.
120. О. Ф. Парилова. Принцип подбора водоподготовительных установок обратного осмоса // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2000. – №7. – С. 3–5.
121. М. Т. Брык, Р. Р. Нигматулин. Нанофильтрация и нанофильтрационные мембраны // Химия и технология воды. – 1995. – Т. 17. – №4. – С. 375–396.

122. В. И. Федоренко, В. М. Сидоренко. Мембранные фильтры для современных систем водоподготовки // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №9. – С. 1–3.
123. Л. В. Ерохина. Мембранная технология в спиртовой и ликероводочной промышленности // Производство спирта и ликероводочных изделий. – 2003. – №3. – С. 20–23.
124. M. M. Bourbigot, P. Cote, K. Agbekodo. Nanofiltration: An advanced process for the production of high quality drinking water / AWWA, Proc. 1993 Membrane Technology Conf., August 1–4, 1993, Baltimore, MD, p. 207–211.
125. И. И. Бурачевский, В. И. Федоренко. Современные системы водоподготовки для пищевых производств // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №5. – С. 1–5.
126. И. И. Бурачевский, В. И. Федоренко. Подготовка технологической воды и ее влияние на качество водки // Ликероводочное производство и виноделие. – 2003. – №8. – С. 20–23; №9. – С. 18–20; №10. – С. 8.
127. В. И. Федоренко. Технологические особенности эксплуатации мембранных систем водоподготовки // Ликероводочное производство и виноделие. – 2001. – №10. – С. 6–7.
128. С. А. Ликащук, В. И. Федоренко. Заводская система водоподготовки ОАО «Московский завод Кристалл» // Ликероводочное производство и виноделие. – 2000. – №10. – С. 6–8.
129. Ю. А. Ситняковский, О. Ф. Парилова. Внедрение обратноосмотического обессоливания воды на электростанциях // Тяжелое машиностроение. – 1997. – №8. – С. 13–15.
130. А. Г. Первов и др. Применение и сервис систем водоподготовки с применением мембран // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №5. – С. 17–19.
131. А. Г. Первов, Е. В. Дудкин. Особенности отечественного рынка водочистных технологий // Ликероводочное производство и виноделие. – 2001. – №12. – С. 8–9.
132. А. В. Десятов, В. Г. Гнеденко. Современные возможности и оборудование для опреснения минерализованных природных и сточных вод // Конверсия в машиностроении. – 2002. – №6. – С. 116–120.
133. В. И. Федоренко. Современные системы водоподготовки для производства напитков // Пиво и напитки. – 2003. – №1. – С. 38–40.
134. Ю. И. Колодный. Использование дисковых фильтров «ARKAL» // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №3. – С. 30–31.
135. М. И. Сметанин. Обработка воды ультрафиолетом // Пиво и напитки. – 2003. – №2. – С. 30.
136. С. В. Храменков и др. К вопросу о рациональном использовании УФ-облучения в целях обеззараживания питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 17–19.
137. С. В. Волков и др., Технологические аспекты обеззараживания воды УФ-облучением // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 17–19.

138. С. В. Костюченко и др. УФ-излучение для обеззараживания питьевой воды из поверхностных источников // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №2. – С. 12–16.
139. А. Б. Преображенский. Обеззараживание воды УФ-облучением – универсальный метод // Аква-Терм. – 2002. – Март. – С. 36–39.
140. С. В. Волков и др. Опыт и перспективы применения УФ-обеззараживания // Экология и промышленность России. – 2000. – Сентябрь. – С. 30–34.
141. А. И. Ажегиревич, В. В. Гутенев, А. В. Преображенский. – Обеззараживание питьевой воды УФ-облучением с последующим внесением ионов серебра // Экологические системы и приборы. – 2002. – №12. – С. 26–30.
142. Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 47–52, 114–117.
143. Установка импульсного ультрафиолетового обеззараживания воды // По всей стране. – 2003. – №3. – С. 19.
144. Хлоратор АХВ-1000 / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 46.
145. А. Б. Кожевников, О. П. Петросян. Основные аспекты развития хлоратора АХВ-1000 // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – №8. – С. 10–13.
146. А. А. Анискин и др. Хлораммонизация воды на водопроводных станциях г. Ярославля / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 189–191.
147. А. А. Пьянов, Л. А. Бруснигина, И. А. Демин. Результаты промышленных испытаний технологии постаммонизации на сооружениях МУП «Водоканал» г. Екатеринбурга / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2.. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 137–141.
148. Установка приготовления диоксида хлора / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2.. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 142.
149. С. В. Храменков, А. В. Коверга, Б. В. Малышев. Результаты испытаний обеззараживания воды р. Москвы диоксидом хлора // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №10. – С. 2–4.
150. И. Г. Корженяк. Сравнительная оценка технологий получения диоксида хлора // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №10. – С. 5–7.
151. В. К. Лапшин. Экономичный метод дезинфекции воды // Пиво и напитки. – 2003. – №1. – С. 42.
152. «Санер» желает вам «легкой» воды // Водолей. – 2001. – №2. – С. 36–37.
153. Технология подготовки питьевой воды с использованием технического гипохлорита натрия / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 45.

154. Электролизные установки для получения гипохлорита натрия «Санер-5» / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 27–28.
155. М. А. Омаров, В. В. Очков, Е. Г. Дедович. Кинетические особенности электрохимической и сорбционной очистки термоминеральных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №1. – С. 6–8.
156. В. Н. Вигдорович, Ю. А. Исправников, Э. А. Нижаде-Гавгани. Проблемы озонирования и озонирования. – М. -С.-Пб.: Экоинформ-система, 1994. – 112 с.
157. Озонотехника / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1.– М.: ВИМИ, 2000. – С. 35–36.
158. Озонаторное оборудование / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 37–39.
159. В. И. Семенов. Оборудование для производства озона / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 11–16.
160. Типовой ряд озонаторов ЭИС и осушителей воздуха ОВС / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 17–19.
161. Промышленные озонаторные установки / Там же, С. 20.
162. В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева. Озонирование воды / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 17–20.
163. Г. П. Медведев, Ю. А. Трухин, Е. А. Евельсон. Технологические исследования по обеззараживанию озонированием природных и сточных вод в Санкт-Петербурге // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №10. – С. 11–13.
164. Комплекс «Импульс» для очистки и обеззараживания воды / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 40–42.
165. А. П. Ильин и др. Устройство для обработки воды электрическими разрядами / Заявка №97100675/25 от 21.01.97.
166. В. И. Федоренко, И. Кирыкин. Бутилирование питьевой воды / Пиво и напитки. – 2002. – №6. – С. 38–39.
167. В. Е. Соловьев и др. Некоторые аспекты озонирования воды р. Чусовая / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 159–164.
168. Е. И. Захаров, Л. С. Рагинский, В. С. Дьяков. Колонные реакторы с импульсным подводом энергии для интенсификации технологических и экологических процессов / Труды 7 Менделеевского съезда. Т. 2. – М., 1998. – С. 72.
169. Е. И. Захаров, В. С. Дьяков. Колонный реактор с импульсным подводом энергии для обеззараживания и кондиционирования питьевой и

- сточных вод / Решение проблем водоподготовки и водоочистки в промышленности и городском хозяйстве. – М.: ВИМИ, 1998. – С. 41–43.
170. В. Д. Исаков. Конверсионное оборудование по обработке воды озонированием / Там же, С. 21–27.
171. O. Kristensen, S. Andersen. Новые стандарты водоподготовки в Дании // Энергосбережение и водоподготовка. – 2001. – №4. – С. 3–12.
172. Н. Д. Рязанов, К. Н. Рязанов. Устройство для очистки и обеззараживания воды / Пат. 2136601, 1998.
173. В. Г. Шубин и др. Питьевая вода из подземных источников // Экология и промышленность России. – 2001. – Декабрь – С. 17–19.
174. В. Н. Лукреченко. Коттеджное оборудование для обезжелезивания и деманганации воды // Водоснабжение и санитарная техника. – №7. – 2000. – С. 26–27.
175. Коагулянты / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 56.
176. В. Е. Соловьев и др. Опыт применения новых коагулянтов на основе солей алюминия / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 155–159.
177. А. Б. Преображенский. Очистка воды с помощью коагулянтов // Акватерм. – 2002. – Март. – С. 42–44.
178. В. Л. Драгинский, Л. П. Алексеева. Повышение эффективности реагентной обработки воды на водопроводных станциях // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – №5. – С. 11–14.
179. С. В. Храменков, А. В. Коврига, О. Е. Благова. Использование современных коагулянтов и флокулянтов в системе Московского водопровода // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №3. – С. 5–7.
180. С. Г. Гумен и др. Применение современных химических реагентов для обработки маломутных цветных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №3. – С. 11–14.
181. Лиза Пииртола. Коагулянты на основе трехвалентного железа в подготовке питьевой воды // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №3. – С. 30–32.
182. Олле Соренссон. Полиалюмохлорид – современный флокулянт для водоочистки // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №3. – С. 33–34.
183. А. К. Стрелков, Д. Е. Быков, А. В. Назаров. Изучение коагулирующей способности водных растворов полигидрохлоридов алюминия // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №3. – С. 21–23.
184. В. С. Гетманцев. Состояние производства и импорта алюмосодержащих коагулянтов в России // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 5–10.
185. Л. П. Алексеева. Оценка эффективности применения оксохлорида алюминия по сравнению с другими коагулянтами // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 11–14.

186. В. З. Волков, Е. А. Столярова, Е. А. Никольская. Новые коагулянты в практике московского водопровода // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 17–20.
187. И. А. Герасименко и др. Применение различных типов коагулянтов при водоподготовке в Минске // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – №2. – С. 21–24.
188. Р. Н. Сафин и др. Применение полиоксихлорида алюминия на водозаборах ОАО «Татнефть» // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – №2. – С. 28–29.
189. А. В. Сычев и др. Применение полиоксихлорида алюминия при подготовке питьевой воды на Крайнем Севере // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – №2. – С. 30–31.
190. Б. П. Персидский и др. Технология очистки донской воды обработкой катионным флокулянтном / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 165–167.
191. Угли активные / Каталог ОАО «Сорбент». – 45 с.
192. А. Д. Смирнов. Сорбционная очистка воды. – Л.: Химия, 1982. – 168 с.
193. А. М. Когановский. Адсорбция органических веществ из воды. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
194. О. А. Глебова. Активированные угли «Чемвирон Карбон» / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 29–31.
195. Фильтранты и углеродный сорбент / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 34.
196. М. Н. Филина. Активированные угли и коагулянты для производства пива и напитков // Пиво и напитки. – 2002. – №2. – С. 46.
197. В. И. Миркис, А. Д. Смирнов. Технология углевания / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 28–29.
198. Сайт фирмы «Purolite», [www.Purolite.com](http://www.Purolite.com).
199. Сайт фирмы «Dow Chemical», [www.Dow.com](http://www.Dow.com).
200. Сайт фирмы «Rohm and Haas», [www.Rohmhaas.com](http://www.Rohmhaas.com).
201. Сайт фирмы «Bauer», [www.Levatit.com](http://www.Levatit.com).
202. Ионный обмен в технологии и анализе неорганических веществ. – М.: Химия, 1980. – 272 с.
203. Е. И. Захаров, Б. Е. Рябчиков, В. С. Дьяков. Ионнообменное оборудование атомной промышленности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
204. М. М. Сенявин. Ионный обмен в технологии и анализе неорганических веществ. – М.: Химия, 1980. – 272 с.
205. А. И. Волжанский, В. А. Константинов. Регенерация ионитов. – Л.: Химия, 1990. – 240 с.
206. Б. Е. Рябчиков, Е. И. Захаров. Ионнообменное оборудование для водоочистки и водоподготовки. – М.: ЦНИИцветметинформации, 1984. – 54 с.

207. Б. Е. Рябчиков, Е. И. Захаров. Ионнообменные установки для водоочистки и водоподготовки. – М.: ЦНИИцветметинформации, 1985. – 65 с.
208. Н. Е. Межевич. Методы интенсификации регенерации сорбентов в системах водоподготовки // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №1. – С. 88–92.
209. В. Д. Гребенюк, А. А. Мазо. Обессоливание воды ионитами. – М.: Химия, 1980. – 256 с.
210. А. Аширов. Ионнообменная очистка сточных вод, растворов и газов. – Л.: Химия, 1983. – 295 с.
211. C. Bettle, G. Lisson. Comparison of Three Different Counterflow Regeneration Systems in 640 m<sup>3</sup>/h Water Plant // IWC. – 1997. – №16.
212. S. D. Strauss. Consider upflow regeneration as demineralization alternative // Power. – 1995. – №7. – P. 43–44.
213. С. М. Карпачева, Б. Е. Рябчиков. Пульсационная аппаратура в химической технологии. – М.: Химия, 1983. – 224 с.
214. Б. Е. Рябчиков и др. Очистка ЖРО непрерывным ионным обменом // Атомная энергия. – 1975. – Т. 38. – №4. – С. 222–225.
215. Б. Е. Рябчиков и др. Очистка радиоактивно-загрязненных вод смешанным слоем ионитов в установке непрерывного действия // Атомная энергия. – 1983. – Т. 55. – №6. – С. 373–376.
216. Б. Е. Рябчиков, Е. И. Захаров, В. С. Дьяков. Аппараты и установки непрерывного ионного обмена для водоочистки и водоподготовки / Решение проблем водоподготовки и водоочистки в промышленности и городском хозяйстве. – М.: ВИМИ, 1998. – С. 13–14.
217. Л. Б. Зубакова, А. С. Тавлина, А. Б. Даванков. – Синтетические ионнообменные материалы. – М.: Химия, 1978. – 184 с.
218. A. Lettofsky. Criteria for choosing anion exchange resin // Water technology. – 1998. – №9. – P. 94–98.
219. S. Ziarkowski. Removing waters bitter taste // Water technology. – 1997. – №6. – P. 76–81.
220. И. С. Балаев, Б. К. Кусманов, Н. Т. Бондарев. Водоподготовка: новая противоточная технология // Аква-Терм. – 2001. – Июль. – С. 46–47.
221. Э. Г. Амосова, П. И. Долгополов, Р. И. Гутникова. Опыт применения противоточного натрий-катионирования в промышленной котельной // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №2. – С. 48–50.
222. D. Edison. Learn the difference among iodinated resins // Water technology. – 1998. – №10. – P. 76–79.
223. Э. Г. Амосова, П. И. Долгополов. Применение карбоксильных катионитов и органопоглощающих анионитов в технологии подготовки воды в котельных // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №1. – С. 25–28.
224. Б. Н. Ходырев и др. Механизм проскока анионов органических веществ через ионитные фильтры ХВО и БОУ // Теплоэнергетика. – 1999. – №7. – С. 2–6.

225. С. Л. Громов. Выбор анионита для эффективного удаления органических примесей из природной воды // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №1. – С. 41–43.
226. Н. А. Зройчиков и др. Результаты испытаний анионитов, поглощающих органические вещества в схемах химического обессоливания добавочной воды на ТЭЦ // Теплоэнергетика. – 1999. – №7. – С. 7–16.
227. Э. Г. Амосова и др. Н-катионирование в режиме «голодной» регенерации на катионите КУ-2–8 // Химия и технология воды. – 1984. – Т. 6. – №1. – С. 32–34.
228. А. В. Мамченко, Е. А. Валуйская. Техничко-экономическое обоснование применения карбоксильных ионитов для глубокого умягчения воды // Химия и технология воды. – 2000. – Т. 22. – №5. – С. 505–531.
229. А. В. Мамченко, Т. И. Якимова, Г. В. Климова. Динамика регенерации карбоксильных акриловых катионитов серной кислотой // Химия и технология воды. – 2001. – Т. 23. – №3. – С. 257–270.
230. А. В. Мамченко, Т. И. Якимова, Г. В. Климова. Условия регенерации карбоксильных акриловых катионитов стехиометрическим количеством серной кислоты // Химия и технология воды. – 2000. – Т. 22. – №6. – С. 570–581.
231. Р. М. Малышев и др. Способ противоточной регенерации ионитов / Пат РФ №2149685, 1999.
232. И. А. Малахов, Г. И. Малахов. Экономичные малоотходные технологии подготовки воды на ТЭС и котельных // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №1. – С. 24–25.
233. Материалы семинара фирмы «Rohm and Haas», 2001 г. – 209 с.
234. Н. В. Макарова, Т. Е. Митченко. Сравнительная экономическая оценка схем катионирования при подготовке воды на ТЭС и АЭС // Энергетика и электрификация. – 2000. – №11. – С. 22–26.
235. А. И. Назаров, Б. Д. Соколин. Метод ионного обмена при подготовке воды в пивоварении // Пиво и напитки. – 2001. – №5. – С. 18–19.
236. П. Б. Морин. Щелочность воды и ее устранение // Пиво и напитки. – 2003. – №3. – С. 26–27; Пищевая промышленность. – 2003. – №6. – С. 56–57; Индустрия напитков. – 2003. – №4. – С. 6–7.
237. M. Gottlib. Softeners: Increasing salt efficiency – regenerant contact time, concentration & other factors // Water Conditioning & Purification. – 2001. – April. – P. 32–37.
238. Н. Г. Вурдова, В. Т. Фомичев. Электродиализ природных и сточных вод. – М.: АСВ, 2001.
239. В. А. Шапошник. Мембранная электрохимия // Соросовский образовательный журнал. – 1999. – №2. – С. 71–74.
240. Д. В. Адамович и др. Электродиализатор фильтпрессного типа / Пат. S 41793949, 1993.
241. В. И. Демкин, Д. В. Адамович. Комплектация опытно-промышленного двухступенчатого мембранного блока на МСП для очистки и концен-

- трирования отходов низкого уровня активности // Труды МосНПО «Радон». – 1998. – №4. – С. 31–35.
242. А. И. Криворучко и др. Дезактивация маломинерализованной радиоактивно-загрязненной воды методом электродиализа // Химия и технология воды. – 1996. – №3. – С. 310–312.
243. Ю. В. Карлин, В. Н. Кропотов. Пусконаладочные работы и испытания передвижной установки для экспрессной аварийной очистки поверхностных стоков // Труды МосНПО «Радон». – 1998. – №4. – С. 47–50.
244. Ли Чанг и др. Электродеионизация дополняет технологии ионообменных смол и обратного осмоса // Мировая электроэнергетика. – 1998. – №4. – С. 32–34.
245. Л. Бердникова, Е. Савриков. Экологические аспекты очистки воды от железа в коттеджном строительстве // АКВА-ВОКС. – 2002. – №1. – С. 6.
246. В. И. Ильин. Умягчение природных вод электрохимическим способом // Энергосбережение и водоподготовка. – 2001. – №1. – С. 66–68.
247. А. Б. Преображенский. Особенности и преимущества электрохимического метода очистки и обработки воды // Аква-Терм. – 2003. – Март, №2. – С. 40–43.
248. Сайт НПО «Экран», [www.izumrud.agava.ru](http://www.izumrud.agava.ru).
249. А. В. Мошкарин, А. А. Мошкарин. Сравнение двух типов автономных испарительных установок // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – №2. – С. 19–26.
250. А. С. Седлов и др. Освоение малоотходной технологии термической водоподготовки на Саранской ТЭЦ-2 // Энергосбережение и водоподготовка. – 2002. – №1. – С. 13–16.
251. В. С. Петин и др. Пути повышения эффективности технологии водоподготовки на ТЭС ОАО «Татэнерго» // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №2. – С. 29–32.
252. В. И. Аксенов и др. Использование обессоливающих установок в замкнутых системах водопользования // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №1. – С. 9–11.
253. Сайт НПП «Машпром», [www.mashprom.ru](http://www.mashprom.ru).
254. А. С. Седлов и др. Техничко-экономическое сравнение схем водоподготовительных установок ПГУ ТЭС // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №4. – С. 20–24.
255. В. И. Федоренко, Н. Е. Ковалева. Регенерационная промывка установок обратного осмоса // Ликероводочное производство и виноделие. – 2002. – №6. – С. 4–5.
256. В. И. Федоренко, Н. Е. Ковалева. Применение ингибиторов осадкообразования при эксплуатации установок обратного осмоса // Ликероводочное производство и виноделие. – 2003. – №№4 и 6. – С. 12–13.
257. В. И. Федоренко. Санитизация мембранных систем водоподготовки // Ликероводочное производство и виноделие. – 2002. – №2. – С. 6–7.

258. Я. Резник. О водородном показателе и стабильности воды // *Аква-Терм.* – 2003. – Март. №2. – С. 71.
259. А. И. Каширский. Магнитные преобразователи воды МПВ // *Аква-Терм.* – 2002. – №1. – С. 45–46.
260. В. В. Банников, С. В. Савинков. Нетрадиционный метод устранения накипи и инкрустаций // *Аква-Терм.* – 2002. – Март. – С. 38–40.
261. А. А. Матвиевский. Магнитная технология безреагентной водоподготовки // *Сантехника, отопление, кондиционирование.* – 2003. – №3. – С. 36–37.
262. В. А. Писсяжнюк. Физико-химические основы предотвращения кристаллизации солей на теплообменных поверхностях // *Сантехника, отопление, кондиционирование.* – 2003. – №10. – С. 26–30.
263. Электронные приборы для защиты и устранения накипи и солевых наслоений // *АКВА-ВОКС.* – 2002. – №1. – С. 2–3.
264. Bennet P. Bofford. Водоподготовка для систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и холодильных установок // *АВОК.* – 1999. – №6. – С. 40–47.
265. Б. Н. Дрикер, С. В. Смирнов. О механизме ингибирования минеральных отложений органическими фосфонатами // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2003. – №1. – С. 39–41.
266. Б. Н. Дрикер и др. Ресурсосберегающие технологии в водоподготовке промышленных предприятий и теплоэнергетике // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2001. – №4. – С. 13–19.
267. Б. Н. Максимов. Обработка воды в системах отопления и горячего водоснабжения антинакипином СК-110 // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2003. – №1. – С. 45.
268. С. П. Колеватов, Б. Г. Хакимов. Применение комплексонов в коммунальных теплосетях // *Экология и промышленность России.* – 2002. – Октябрь. – С. 17–19.
269. Е. М. Марченко, А. Б. Премаков. Метод «Гидро-Икс»: подготовка воды для котлов и систем отопления // *Аква-Терм.* – 2002. – Март. – С. 34–36.
270. Е. М. Марченко, А. Б. Премаков. Метод коррекционной обработки воды для закрытых систем теплоснабжения и котлов // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2002. – №2. – С. 8–11.
271. И. В. Семенова, С. В. Симонова, А. В. Хорошилов. Влияние показателя рН на процессы водоподготовки с использованием коагулянта «Гидро-Икс» // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2003. – №2. – С. 45–48.
272. А. В. Хорошилов, И. В. Семенова. Термодинамика образования карбоната кальция при очистке природной воды // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2003. – №2. – С. 40–45.
273. Ф. Ф. Чусов и др. Комплексоновые технологии в коммунальной теплоэнергетике // *Экология и промышленность России.* – 2001. – Октябрь. – С. 16–19.

274. Ф. Ф. Чусов и др. Применение комплексонов при обработке воды для паровых котлов // *Экология и промышленность России.* – 2003. – Июнь. – С. 17–22.
275. Ф. Ф. Чусов, Г. А. Раевская, М. А. Плетнев. Применение ингибиторов солеотложения и коррозии в системах отопления // *Сантехника, отопление, кондиционирование.* – 2003. – №9. – С. 30–33.
276. Л. Т. Васина, О. В. Гусев. Предотвращение накипеобразования с помощью антинакипинов // *Теплоэнергетика.* – 1999. – №7. – С. 30–35.
277. И. В. Семенова, А. В. Хорошилов. Экологически эффективные ингибиторы для систем водопользования на предприятиях энергетического комплекса // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2000. – №4. – С. 85–88.
278. Ю. А. Рахманин и др. Наполнитель устройства для получения питьевой воды / Пат. РФ №2138449, 1999.
279. А. В. Пименов, А. Г. Митилениос, Д. Л. Шмидт. Способ обеззараживания питьевой воды / Пат. РФ №2172720, 2000.
280. В. В. Денисов и др. Сокращение применения хлорсодержащих дезинфектантов в питьевом водоснабжении // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2001. – №1. – С. 27–29.
281. В. М. Бахир, Ю. Г. Задорожний. Способ обработки питьевой воды / Пат. РФ №2149835, 2000.
282. А. Н. Ульянов. Установка для обеззараживания водных сред / Пат. РФ №2170713, 1999.
283. В. Г. Иванов и др. Обеззараживание питьевых и сточных вод продуктами электрохимической активации // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2000. – №10. – С. 26–29.
284. А. Б. Акользина, Л. Б. Бухгалтер, В. А. Хабаров. Электрохимическая обработка воды как экологически безопасный метод снижения численности коррозионно-активных микроорганизмов // *Энергосбережение и водоподготовка.* – 2003. – №3. – С. 53–56.
285. О. Ю. Кузнецов, Н. И. Данилина. Очистка и обеззараживание воды бактерицидным полиэлектролитом // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2000. – №10. – С. 8–10.
286. О. Ю. Кузнецов. Обеззараживание воды питьевого назначения полигексаметиленгуанидинфосфатом // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2002. – №7. – С. 8–11.
287. К. М. Ефимов, П. А. Гембицкий, В. А. Никашина. Органоминеральный сорбент ЦЕОПАГ в очистке питьевых и сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2002. – №7. – С. 12–15.
288. Производство коагулянта полиалюминий гидрохлорида «Бонак-Е» / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 2. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 134–136.
289. К. М. Ефимов и др. Дезинфицирующие флокулянты для очистки и обеззараживания питьевых и сточных вод // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 2001. – №6. – С. 13–17.

290. В. В. Гугенев и др. Использование ионов меди в системах водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. – 2002. – №1. – С. 14–16.
291. В. А. Свирида и др. Устройство для стерилизации жидкостей / Пат. 2144002, 1994.
292. В. Е. Оганссов. Установка для обработки воды ионами серебра / Пат. 2143406, 1998.
293. Л. А. Юткин. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – Л.: Машиностроение, 1986. – 253 с.
294. В. В. Миронов. Электроимпульсная установка для обеззараживания жидкостей / Пат. 2144003, 1999.
295. А. Б. Преображенский. Нитратный вопрос в свете автономного водоснабжения // Аква-Терм. – 2002. – Июль. – С. 43–45.
296. Блочные монолитные пористые картриджи для устройств очистки питьевой воды // По всей стране. – 2003. – №3. – С. 10–11.
297. А. А. Поворов и др. Бытовые мембранные приборы для получения питьевой воды // Химия в интересах устойчивого развития. – 1997. – №5. – С. 417–421.
298. М. В. Соколов, А. Л. Гуревич. Автоматическое дозирование жидких сред. – Л.: Химия, 1987. – 400 с.
299. Дозирующие насосы / Новые технологии и оборудование в водоподготовке и водоотведении. Сб. Вып. 1. – М.: ВИМИ, 2000. – С. 163–166.
300. А. Б. Баркасов. Дозирующие насосы в системах водоподготовки // Аква-Терм. – 2002. – Июль. – С. 38–40.
301. Т. Гиндулин. Рекомендации по подбору дозирующей техники для бассейнов // Банбас. – 2000. – №4. – С. 50–56.
302. Сайт фирмы «Tapflo», www.tapflo.com.
303. Я. Резник. О некоторых терминах водоподготовки // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №2. – С. 89–91.
304. Я. Е. Резник. О некоторых терминах и единицах измерений величин в водоподготовке // Энергосбережение и водоподготовка. – 2003. – №3. – С. 90–93.

## Содержание

Введение .....	3
<b>1. Показатели качества воды. Требования к качеству воды.....</b>	<b>7</b>
1.1. Физико-химические показатели качества воды.....	7
1.2. Требования к качеству воды.....	11
1.2.1. Питьевая вода .....	11
1.2.2. Вода для промышленности и энергетики .....	15
<b>2. Примеси в природной воде. Методы удаления загрязнений из раствора. Основные процессы и их аппаратное оформление .....</b>	<b>21</b>
2.1. Физические методы очистки .....	22
2.1.1. Отстаивание .....	26
2.1.2. Фильтрация через зернистые загрузки.....	26
2.1.3. Фильтрация через пористую перегородку .....	40
2.1.4. Обработка воды ультрафиолетом.....	80
2.2. Химические методы очистки.....	84
2.2.1. Процессы окисления .....	84
2.2.2. Осадительные методы .....	92
2.3. Физико-химические методы очистки .....	97
2.3.1. Сорбционные процессы.....	97
2.3.2. Электродиализ.....	138
2.4. Сравнение методов очистки воды.....	142
<b>3. Способы водоподготовки. Очистка воды для промышленного и бытового использования. Основные понятия и принципиальная схема.....</b>	<b>143</b>
3.1. Методы извлечения и разделения частиц.....	144
3.2. Очистка от взвешенных частиц.....	145
3.3. Обезжелезивание .....	145
3.4. Умягчение воды.....	151
3.4.1. Реагентное умягчение .....	151
3.4.2. Ионный обмен .....	153
3.4.3. Наночистка.....	163
3.4.4. Электрохимическая обработка.....	165
3.5. Обессоливание .....	167
3.5.1. Термические методы обработки воды.....	168
3.5.2. Обессоливание воды ионным обменом.....	172
3.5.3. Обратный осмос и наночистка .....	178
3.5.4. Сравнение методов обессоливания .....	186
3.6. Кондиционирование воды .....	190
3.6.1. Стабилизационная обработка воды для тепловых процессов .....	190
3.6.2. Кондиционирование питьевой воды.....	195
3.6.3. Кондиционирование воды для пищевой промышленности.....	196
3.7. Обеззараживание питьевой воды.....	197

3.8. Удаление органических загрязнений.....	203
3.9. Дехлорирование.....	204
3.10. Удаление нитратов.....	206
<b>4. Построение аппаратурно-технологических схем очистки воды для бытовых и промышленных целей. Примеры использования.....</b>	<b>208</b>
4.1. Очистка воды в коттеджах.....	208
4.2. Подготовка воды для ликероводочных производств.....	212
4.2.1. ОСТ АЛКО.....	214
4.2.2. ФЕРЕЙН.....	218
4.2.3. Сравнение схем умягчения.....	223
4.3. Водоподготовка для производства соков.....	224
4.3.1. Производство соков на ООО «Амтел».....	224
4.3.2. Производство соков на ООО «Мултон».....	228
4.4. Модернизация существующего оборудования водоподготовки.....	231
4.5. Подготовка воды для производства пива.....	235
4.6. Подготовка воды для подпитки теплосети.....	237
4.7. Подготовка воды для теплоэнергетики.....	241
4.8. Подготовка воды для производства лакокрасочной продукции.....	247
4.9. Мобильные станции водоподготовки.....	257
4.10. Установка для получения воды для медицинских целей.....	261
4.11. Очистка подземных вод Ямало-Ненецкого автономного округа.....	265
<b>5. Бытовые малогабаритные устройства очистки воды.....</b>	<b>271</b>
<b>6. Вспомогательные устройства, насосы-дозаторы.....</b>	<b>277</b>
6.1. Мембранные насосы с пневматическим приводом.....	281
6.2. Перистальтические насосы.....	282
<b>Приложения.....</b>	<b>286</b>
1. О расчете аппаратурно-технологических схем и аппаратов систем водоподготовки.....	286
2. Тезаурус.....	287
3. Состав вод и рек РФ и СНГ.....	291
4. Преобразование английских и метрических единиц.....	293
5. Данные по веществам, входящим в состав воды и используемым для ее очистки.....	295
6. Выбор методов очистки в зависимости от качества исходной воды и требований потребителя.....	297
7. Условия эксплуатации фильтрующих материалов и ионообменных смол.....	303
8. Условия эксплуатации фильтрующих материалов на основе двуокиси марганца.....	305
9. Сравнение расхода перманганата калия.....	307
<b>Литература.....</b>	<b>308</b>



*Научно-производственная  
компания*

**МЕДИАНА-ФИЛЬТР**

**ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ ВОДОПОДГОТОВКИ**

на базе комплексных автоматических  
установок

- Мембранное оборудование (микро-, ультра-, нанофильтрация и обратный осмос)
- Противоточные ионообменные фильтры для умягчения и деминерализации
- Станции дозирования реагентов
- Электродеионизация
- Озонаторы и установки ультрафиолетового обеззараживания
- Фильтры механической очистки
- Фильтрующие материалы (ионообменные смолы, среды для удаления железа, марганца, хлора, органики, механических загрязнений и пр.)
- Комплектующие (насосы, арматура, фитинги, трубопроводы, средства КИПиА)

**Подбор оборудования и адаптация современных технологий к конкретным условиям эксплуатации и особенностям регионального состава воды!**

111116, г. Москва, Энергетический проезд, 6  
Тел. (095) 234-16-60 – многоканальный, 362-74-75, 362-78-25  
факс (095) 234-19-77  
[www.mediana-filter.ru](http://www.mediana-filter.ru)

Производственно-практическое издание

Рябчиков Борис Евгеньевич

Современные методы подготовки  
воды для промышленного и бытового  
использования

Главный редактор *О. В. Саламаха*  
Научный редактор *О. В. Кислухина*  
Редактор *Г. И. Елагин*  
Художник *Л. Б. Саламаха*  
Компьютерная верстка *Н. И. Смирнова*  
Фотограф *М. А. Вацук*

Изд. лиц. ИД № 02500 от 31.07.00. Подписано в печать 05.08.04. Формат 60×88 1/16.

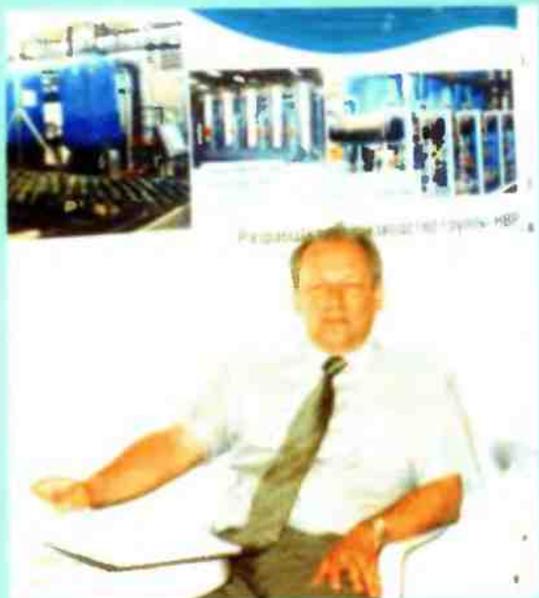
Бумага офсет № 1. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 18,9.

Тираж 5000 экз. Заказ № 9704.

Издательство «Делфи принт». 123181, г. Москва, а/я 42, тел. (095) 265-7145, 742-94-95

Отпечатано в ФГУП «Производственно-издательский комбинат ВИНТИ»

140010, г. Люберцы, Московской обл., Октябрьский пр-т, 403.



### Сведения об авторе

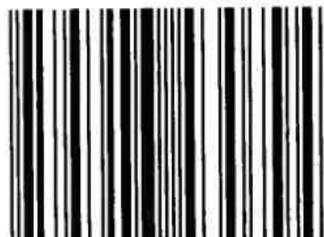
Рябчиков Борис Евгеньевич.  
После окончания МХТИ им.  
Д. И. Менделеева работает на  
Московской станции пере-  
работки жидких радиоактивных  
отходов ФГУП ВНИИ неорга-  
нических материалов им.  
А. А. Бочвара, в Агентстве по  
атомной энергии РФ.

Доктор технических наук,  
старший научный сотрудник.  
Автор и соавтор более 100  
научных работ, включая 7 книг и  
брошюр и изобретений.

Основная научная деятельность  
связана с разработкой процессов  
и аппаратов, методов расчета и  
моделирования, их исследо-  
ванием и внедрением в процес-  
сы водоподготовки и очистки  
промышленных вод.

Под его руководством и при  
непосредственном участии соз-  
даны промышленные и экспери-  
ментальные аппараты и установ-  
ки непрерывного ионного обме-  
на для очистки жидких отходов  
ряда производств, а также серия  
установок подготовки воды для  
пищевой промышленности, в  
том числе описанных в данной  
работе.

ISBN 5-94343-079-2



9 785943 430794