

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТЕХНОЛОГИИ ВОДООЧИСТКИ

ЧАСТЬ II. КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ АППАРАТОВ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
«ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ,  
АППАРАТЫ И РЕЖИМЫ»

Казань 2014

УДК 621.311.22:532(075.8)

ББК 31.37

Л24

*Рецензенты:*

доктор технических наук, заслуженный деятель науки РТ,  
начальник научно-технического отдела ФКП «КГКПЗ» *Е.Л. Матухин*;  
доктор технических наук, профессор Казанского государственного  
энергетического университета *Н.Д. Чичирова*

Л24      **Лаптев А.Г., Шинкевич Е.О.**

**Гидромеханические процессы в технологии водоочистки.**  
**Часть II. Конструкции и расчет аппаратов:** учеб. пособие в 2-х  
частях / А.Г. Лаптев, Е.О. Шинкевич. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т,  
2014. – 219 с.

Представлены общие сведения о процессе отстаивания, типы и конструкции различных отстойников в процессах водоподготовки и водоочистки. Приведены основы расчета промышленных отстойников. Особое внимание уделено типам тонкослойных отстойников, особенностям их конструкций и методов расчета. Представлены конструкции фильтров, подробно рассмотрены фильтры водоподготовительных установок. Приведены примеры расчетов фильтров. Дано описание процесса центрифугирования, конструкции центрифуг, методы расчета. Уделено внимание флотационным методам очистки сточных вод и конструкциям флотаторов.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 140103.65 «Технология воды и топлива на тепловых и атомных электрических станциях», а также может быть полезно преподавателям, аспирантам и студентам старших курсов технических и энергетических вузов.

УДК 621.311.22:532(075.8)

ББК 31.37

© Лаптев А.Г., Шинкевич Е.О., 2014

© Казанский государственный энергетический университет, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
<b>ГЛАВА 1. ОТСТАИВАНИЕ .....</b>	<b>7</b>
1.1. Общие сведения о процессе отстаивания .....	7
1.2. Типы отстойников и области их применения .....	9
1.2.1. Отстойники для систем водоподготовки .....	10
1.2.2. Промышленные отстойники .....	16
1.2.3. Тонкослойные отстойники .....	21
1.3. Песколовки .....	31
1.4. Осветлители .....	33
1.5. Отстойники и нефтеловушки .....	35
1.6. Определение поверхности осаждения в отстойниках .....	41
1.7. Методика расчета тонкослойных отстойников .....	46
1.8. Примеры решения задач .....	53
 <b>ГЛАВА 2. ФИЛЬТРОВАНИЕ .....</b>	 <b>61</b>
2.1. Описание процесса фильтрования .....	61
2.2. Предварительное фильтрование воды .....	63
2.3. Классификация методов предварительной фильтрации .....	66
2.4. Фильтрация через зернистые фильтры .....	73
2.4.1. Основы расчета .....	73
2.4.2. Характеристики фильтрующих материалов .....	75
2.4.3. Фильтрационные установки с зернистой загрузкой .....	77
2.5. Ионитные фильтры .....	85
2.6. Промывка осадков на фильтрах .....	95
2.7. Промывка методом разбавления (репульсионная промывка) ....	98
2.8. Очистка конденсатов электромагнитными фильтрами .....	98
2.9. Очистка конденсатов на намывных фильтрах .....	101
2.10. Расчет фильтров .....	104
2.11. Примеры расчета .....	108
 <b>ГЛАВА 3. РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ .....</b>	 <b>111</b>
3.1. Описание процесса .....	111
3.2. Устройство центрифуг .....	114
3.3. Расчет центрифуг .....	132
3.4. Примеры решения задач .....	136

ГЛАВА 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ....	136
4.1. Флотация .....	140
4.1.1. Виды флотации .....	140
4.1.2. Количественная теория флотации .....	143
4.2. Способы флотации .....	150
4.3. Конструкции флотационных установок .....	157
4.4. Пример расчета флотатора .....	166
4.5. Коагуляция .....	167
ГЛАВА 5. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОДООЧИСТКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ .....	180
5.1. Мембранные технологии на стадии предочистки исходной воды ....	193
5.2. Перспективы развития технологии водоочистки .....	202
5.2.1. Методы снижения концентрации остаточного алюминия при подготовке питьевой воды .....	203
5.2.2. Новые конструкции камер хлопьеобразования гидравли- ческого типа .....	205
5.2.3. Использование тонкослойных сотоблоков из полиэтиленовой пленки для повышения эффективности работы отстойников и осветлителей со взвешенным слоем .....	210
5.2.4. Рециркуляция осадка – метод повышения эффективности работы водоочистных сооружений .....	212
5.2.5. Технология удаления загрязнений природного и антропо- генного происхождения озонированием и сорбцией на активных углях	214
5.2.6. Реактивация активных углей .....	218
5.2.7. Использование различных фильтрующих материалов для загрузки фильтров .....	219
5.2.8. Очистка и обессоливание минерализованных природных вод	220
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	223

## ВВЕДЕНИЕ

В зависимости от основных законов, определяющих скорость протекания процессов, различают следующие типы процессов: гидромеханические, тепловые, массообменные, химические и механические. В данном учебном пособии подробно рассмотрены гидромеханические процессы, относящиеся к системам водоочистки.

Гидромеханические процессы это процессы, в которых скорость определяется законами гидродинамики – науки о движении жидкостей и газов. К этим процессам относятся перемешивание и движение в каналах и аппаратах жидкостей, сжатие и перемещение газов, разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле сил тяжести (отстаивание), в поле центробежных сил (центрифугирование), а также под действием разности давлений при движении через пористый слой (фильтрование).

Гидродинамические закономерности часто в значительной степени определяют характер протекания процессов теплопередачи, массопередачи и химических реакционных процессов в промышленных аппаратах.

Современный уровень мирового производства предполагает потребление в технологических целях огромных объемов пресной воды, достигающих в настоящее время 5 триллионов кубических метров в год. После использования воды в технологических процессах образуются промышленные стоки, которые подлежат глубокой очистке, как от растворимых примесей, так и от нерастворимых дисперсных (жидких и твердых) взвесей.

Очистные сооружения сточных вод, в основной массе устарели морально, физически и не справляются с требуемой нагрузкой, а в некоторых населённых пунктах их просто нет. Проблема очистки промышленных стоков приобретает всё более серьёзное значение, поскольку большинство очистных сооружений предприятий не в состоянии обеспечить качественную очистку стоков в соответствии с существующими нормативами.

Несмотря на применение схем оборотного водоснабжения, количество сточных вод промышленных предприятий катастрофически увеличивается. Кроме того, острой проблемой остается качественная очистка воды в водозаборах для промышленных и бытовых целей, в связи с огромными объемами потребляемой водопроводной воды. Большие объемы стоков накладывают особые требования к аппаратурному оформлению процесса очистки.

Часто при разделении гетерогенных систем используются отстойники. Однако такой способ очистки промышленных стоков в современных условиях часто является малоэффективным и используется на предварительных этапах очистки жидкостей. Для повышения эффективности используются тонкослойные отстойники. Такие отстойники оборудуются специальными сепарирующими пластинами. Степень очистки жидкостей от дисперсной фазы в таких отстойниках повышается в несколько раз. Очистка промышленных стоков в песочных и гравийных фильтрах также обладает рядом существенных недостатков, поскольку предполагает периодическую регенерацию или замену фильтрующего материала. Применение для целей очистки промышленных стоков гидроциклонов исключает возможность одновременной очистки от жидких (нефтепродукты) и твердых взвесей, а также достижение высокого качества разделения гетерогенной системы.

Перспективу приобретает метод флотационной очистки промышленных стоков, обеспечивающий высокую степень очистки, как от жидких, так и от твердых дисперсных взвесей при любом объеме стоков. Применение флотационного метода позволяет повысить степень очистки воды, уменьшить расход реагентов, сократить продолжительность процесса очистки, снизить обводненность извлекаемых загрязнений и тем самым упростить процесс их дальнейшей переработки.

На сегодняшний день известно несколько различных способов организации флотационного разделения жидких неоднородных систем, существенно отличающиеся между собой эффективностью очистки и потребляемой энергией. Для некоторых методов флотации, таких как электрофлотация, напорная флотация, характерны высокие энергозатраты. Кроме того, большинство методов флотации предполагает применение дорогостоящих коагулянтов и флокулянтов, что также увеличивает затраты на очистку стоков.

## ГЛАВА 1

### ОТСТАИВАНИЕ

#### 1.1. Общие сведения о процессе отстаивания

Разделение неоднородных систем под действием силы тяжести на составные части (сплошную и дисперсную) проводят при сравнительно малых линейных скоростях потоков. Определяющими параметрами процесса являются скорость осаждения, время пребывания системы в аппарате и размер получаемых фракций. Осаждение может осуществляться также и под действием центробежных сил.

Суспензии классифицируются на грубые, тонкие и взвеси. Очистка воды и других жидкостей от грубодисперсных примесей осуществляется обычно отстаиванием [1–3].

*Отстаивание* является более экономичным процессом, чем другие процессы разделения неоднородных систем, например фильтрование. Кроме того, разделение фильтрованием ускоряется при прочих равных условиях в случае предварительного сгущения фильтруемого материала. Поэтому отстаивание часто используют в качестве первичного процесса разделения, стремясь удалить возможно большие количества вещества из сплошной фазы.

При отстаивании неоднородных систем наблюдается постепенное увеличение концентрации диспергированных частиц в аппарате по направлению сверху вниз (рис. 1.1). Над слоем осадка (зона 1) образуется зона сгущенной суспензии (зона 2), в которой происходит *стесненное осаждение* частиц, сопровождающееся трением между частицами и их взаимными столкновениями. При этом более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой мелкие частицы, ускоряя их движение. В результате наблюдается тенденция к сближению скоростей осаждения частиц различных размеров; возникает *коллективное*, или *солидарное* осаждение частиц с близкими скоростями в каждом сечении аппарата, но с различными скоростями частиц по мере приближения к днищу аппарата. Замедление объясняется тормозящим действием жидкости, вытесняемой осаждающимися частицами и движущейся от неподвижной перегородки (днища) в направлении, обратном движению частиц.

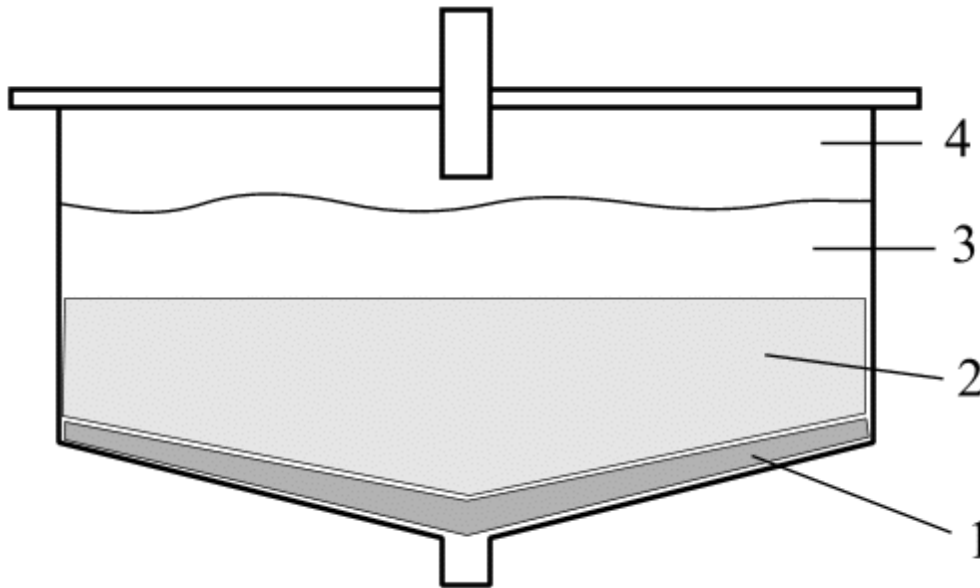


Рис. 1.1. Схема процесса отстаивания:

1 – слой осадка (шлам); 2 – зона сгущенной суспензии; 3 – зона свободного осаждения;  
4 – осветленная жидкость

Как видно из рис. 1.1, образуется ясно выраженная граница между зоной стесненного осаждения (зона 2) и находящейся выше зоной свободного осаждения (зона 3), над которой располагается осветленная жидкость (зона 4). Такая схема несколько упрощает действительную картину процесса осаждения, которая обычно является еще более сложной вследствие образования между указанными выше основными зонами промежуточных (переходных) зон.

Осаждение под действием центробежной силы применяют в случаях, когда гравитационное осаждение оказывается недостаточно эффективным. Обычно это наблюдается, когда плотность частиц  $\rho$  близка к плотности среды, а их размеры  $< 5$  мкм. Такие частицы можно выделять из эмульсий и суспензий в поле центробежных сил.

Для удаления из жидкостей грубодисперсных взвешенных веществ и нерастворенных органических и неорганических примесей применяют отстойники различных типов. Отстаиванием можно выделить взвешенные частицы с плотностью, большей или меньшей плотности жидкости определенного размера. Примеси меньшего размера удалять практически невозможно, поскольку приходится увеличивать продолжительность разделения суспензий или эмульсий до нескольких суток, что экономически нецелесообразно. Продолжительность отстаивания определяется по скорости осаждения взвешенных частиц, которая находится в зависимости от их размера, формы и плотности.



Для интенсификации процесса осаждения высокодисперсных взвешенных и коллоидных частиц применяют различные коагулянты и флокулянты (сульфат алюминия и двухвалентного железа, сульфат или хлорид трехвалентного железа, а так же флокулянты ВА-2, полиакриламид и др.).

При использовании коагулянтов и флокулянтов скорость осаждения высокодисперсных частиц возрастает в 1,4–1,6 раза. Поскольку в потоке определение скорости осаждения коагулированных взвешенных веществ невозможно, скорость осаждения частиц для расчета отстойников следует определять на основе экспериментальной кривой их процентного выпадения. Для построения этой кривой по оси абсцисс откладывают экспериментальные числовые значения продолжительности отстаивания в минутах, а по оси ординат – количество выпавших взвешенных веществ в процентном отношении к первоначальному их содержанию.

В зависимости от требований к качеству очистки жидкостей применяют горизонтальные и радиальные отстойники различной конструкции, которые могут быть оборудованы камерами флокуляции.

## 1.2. Типы отстойников и области их применения

Отстаивание дисперсной фазы и жидкостей проводят в аппаратах, называемых отстойниками, или сгустителями. Различают аппараты периодического, непрерывного и полунепрерывного действия, причем непрерывно действующие отстойники, в свою очередь, делятся на одно-ярусные, двухъярусные и многоярусные.

Размеры и форма аппаратов *периодического действия* зависят от концентрации диспергированной фазы и размеров ее частиц. Чем крупнее частицы и чем больше их плотность, тем меньший диаметр может иметь аппарат. Скорость отстаивания существенно зависит от температуры, с изменением которой изменится вязкость жидкости.

Для отстаивания небольших количеств жидкости применяют отстойники в виде цилиндрических вертикально установленных резервуаров с коническим днищем, имеющим кран или люк для разгрузки осадка и несколько кранов для слива жидкости, установленных на корпусе на разной высоте.

Для отстаивания значительных количеств жидкости, например для очистки сточных вод, используют бетонные бассейны больших размеров или несколько последовательно соединенных резервуаров, работающих полунепрерывным способом: жидкость поступает и удаляется непрерывно, а осадок выгружается из аппарата периодически.

### 1.2.1. Отстойники для систем водоподготовки

Отстойник – технологическое оборудование для очистки сточных вод от взвешенных веществ и нефтепродуктов. Отстойники бывают первичными, для использования перед промышленными или биологическими очистными сооружениями, а также вторичными, используемые для извлечения активного ила. Отстойники подразделяются на вертикальные, горизонтальные и радиальные, в зависимости от направления движения потока жидкости. К отстойникам также относятся осветлители, где одновременно с отстаиванием производится фильтрация сточной воды через слой взвешенного осадка, и осадкоуплотнители, в которых одновременно с очисткой воды производится уплотнение образовавшегося осадка.

Эффективность отстаивания (эффективность осадкообразования в отстойниках) вычисляют по формуле (%):

$$\mathcal{E} = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \cdot 100, \quad (1.1)$$

где  $C_1$  – концентрация взвеси в исходной воде;

$C_2$  – концентрация взвеси в осветленной воде.

Как правило, эффективность отстаивания составляет 40–60 % при продолжительности 1–1,5 ч; эффективность работы осветлителей достигает 70 %.

Для увеличения эффективности осадкообразования в сточную воду добавляют различные флокулянты, способствующие росту скорости осаждения взвешенных веществ.

Расчет отстойников производят с учетом обеспечения требуемой эффективности очистки сточных вод.

На рис. 1.2 показан *горизонтальный отстойник*, используемый на станции очистки бытовых и близких к ним по составу производственных сточных вод прошедших решетки и песколовки.

Такие отстойники применяют при расходах сточных вод более 15000 м<sup>3</sup>/сут. Глубина отстойников достигает 1,5–4 м, отношение длины к глубине 8–12 (до 20). Ширина отстойника зависит от способа удаления осадка и обычно находится в пределах 6–9 м [4].

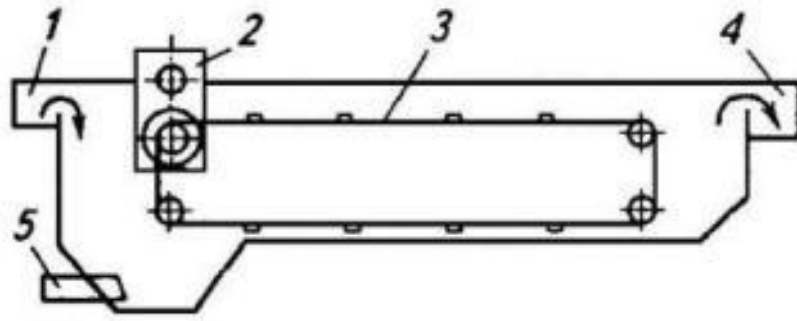


Рис. 1.2. Горизонтальный отстойник:

1 – водоподводящий лоток; 2 – привод скребкового механизма;  
3 – скребковый механизм; 4 – водоотводящий лоток; 5 – отвод осадка

Применяют также горизонтальные отстойники, оборудованные скребковыми механизмами тележечного или ленточного типа (см. рис. 1.2), сдвигающие выпавший осадок в приямок. Объем приямка равен двухсуточному количеству выпавшего осадка.

Из приямка осадок удаляют насосами, гидроэлеваторами, грейферами или под гидростатическим давлением. Осадок сгребается в иловый приямок скребковым механизмом и удаляется плунжерным насосом. Плавающие вещества собираются скребковым механизмом при обратном ходе и удаляются в конце отстойника через поворотную трубу с щелевидными прорезями. Поступившие в сборный колодец плавающие вещества откачиваются для совместной обработки с осадком.

На рис. 1.3 представлен *радиальный отстойник*.

Длину отстойника вычисляют по зависимости:

$$L = \frac{H U}{k w_0}, \quad (1.2)$$

где  $U$  – скорость движения воды в проточной части отстойника (равна 5–10 мм/с);

$H$  – глубина отстойника, м.;

$k$  – коэффициент объемного использования, равный 0,5;

$w_0$  – гидравлическая крупность частиц, которую определяют по кривым кинетики отстаивания  $\Xi = f(t)$ , полученных в лаборатории в статических условиях с последующим приведением полученных результатов к реальным размерам отстойника [4].

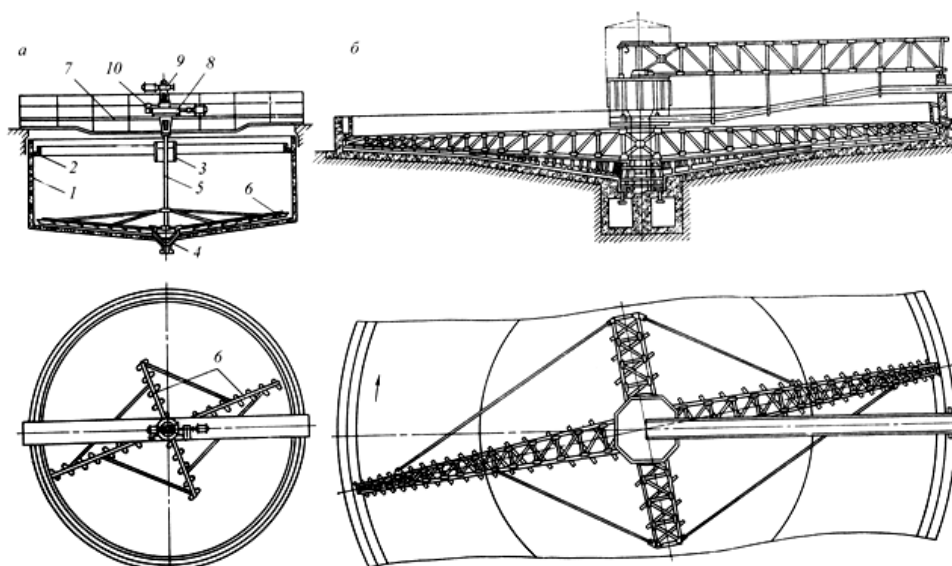


Рис. 1.3. Радиальный отстойник с центральным приводом:  
 1 – чан; 2 – сливной желоб; 3 – загрузочная воронка; 4 – разгрузочный конус;  
 5 – центральный вал; 6 – граблины; 7 – ферма; 8 – привод;  
 9 – механизм для подъема вала с граблинами;  
 10 – указатель перегрузки сгустителя

Отстойники могут быть диаметром 18, 24 и 30 м в виде железобетонного резервуара [5]. Эффективность осветления принимается равной 65 %, принимая коэффициент к равным 0,85. Наиболее распространены отстойники с впуском воды через центральную трубу с раструбом. Скорость движения воды в трубе принимают равной до 30 мм/с. Расстояние между щитом и раструбом выбирают таким, чтобы скорость поступления воды в отстойную зону была не более 20 мм/с. Рекомендуется диаметр раструба и его высоту принимать равными 1,35 диаметра центральной трубы, а диаметр отражательного щита – 1,3 диаметра раструба.

Вода медленно движется от центра к периферии и сливается в периферийный желоб с затопленными отверстиями или треугольными водосливами. Для равномерного отбора осветленной воды по периметру кольцевого периферийного желоба в стенках его на глубине 120–150 мм от поверхности воды устраивают отверстия диаметром 20–30 мм или треугольные сливы высотой 40–60 мм, располагаемые на расстоянии 100–150 мм в осях. Общую площадь отверстий подсчитывают по скорости движения воды в них 0,7 м/с. Скорость движения воды в желобе принимают 0,5–0,6 м/с.

Для удаления осадка служит медленно вращающаяся металлическая ферма с укрепленными на ней скребками, сгребающими осадок к центру отстойника, откуда непрерывно или периодически выпускается или

откачивается. Одним концом ферма опирается на опору в центре отстойника, а другим – на тележку,двигающуюся по стенке отстойника.

Расчет радиального отстойника производят в следующем порядке. Устанавливают необходимый процент задерживания взвеси отстойником по формуле (1.1). Затем подсчитывают скорость выпадения взвеси  $U$ , соответствующую задержанию заданного процента ее по формуле:

$$U = \frac{1,2B - 0,2A - \text{Э}}{B - A}, \quad (1.3)$$

где  $A$  и  $B$  – точки на опытной кривой выпадения взвеси, полученных в лабораторных условиях при различных величинах  $U$  [5].

После этого определяют площадь радиального отстойника,  $\text{м}^2$ :

$$A_{o.p} = \alpha \left( \frac{q}{U} \right)^{1,07} + A_{B.з.}, \quad (1.4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный 0,2;

$q$  – расход воды, поступающий на отстойник,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$A_{B.з.}$  – площадь вихревой зоны отстойника,  $\text{м}^2$ , радиус которой принимают на 1 м радиуса распределительного цилиндра, где вследствие вихреобразного движения воды осаждение взвеси почти не происходит.

По вычисленному значению  $A_{p.o.}$  находят радиус отстойника. Глубину отстойника в центре можно определить по формуле:

$$H = h + R \cdot i, \quad (1.5)$$

где  $h$  – глубина отстойника у периферийного желоба ( $h = 1,2-1,3$  м);

$R$  – радиус отстойника, м;

$i$  – уклон для отстойника ( $i = 0,04-0,5$ ).

Обычно глубина отстойника в центре достигает 3–3,5 м.

Отстойники диаметром до 18 м устраивают с центральным приводом, а при больших размерах – с периферическим.

*Вертикальный отстойник* [5] представляет собой круглый или квадратный в плане резервуар с камерой хлопьеобразования водоворотного типа в центральной трубе и с конусным днищем для накопления и уплотнения осадка. Угол между наклонными стенками принимают 70–80°.

На рис. 1.4 представлен схематический чертеж вертикального отстойника.

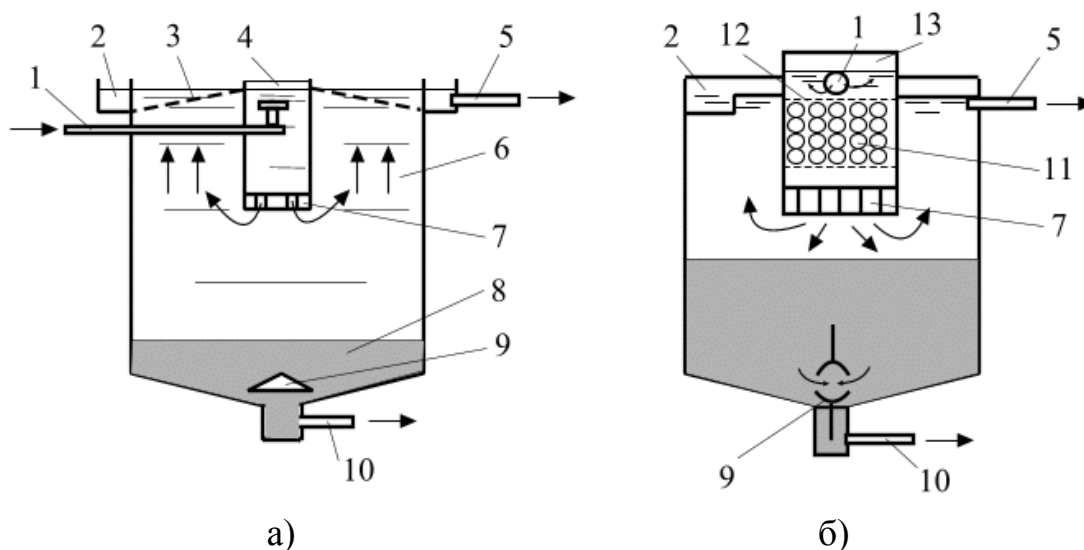


Рис. 1.4. Водоворотная (а) и контактная (б) камеры хлопьеобразования, встроенные в вертикальный отстойник:

1 и 5 – подача исходной и отвод осветленной воды; 2 и 3 – кольцевой и радиальные водосборные лотки; 4 – водоворотная камера; 6 – зона осветления воды; 7 – гаситель; 8 – зона накопления и уплотнения осадка; 9 – конусный отражатель; 10 – удаление осадка; 11 – контактная загрузка из вспененного полистирола; 12 – сетка; 13 – контактная камера

Сбор осветленной воды предусматривается периферийными и радиальными желобами с затопленными отверстиями или с треугольными водосливами. Сечение водосборных желобов определяют по скорости движения воды в них 0,5–0,6 м/с.

При площади отстойника до 12 м<sup>2</sup> предусматривается только периферийный кольцевой желоб, при площади от 12 до 30 м<sup>2</sup> добавляются еще четыре радиальных (в круглых отстойниках) или промежуточных (в квадратных отстойниках); при площади свыше 30 м<sup>2</sup> предусматривается 6–8 дополнительных желобов.

Расчет вертикальных отстойников производят на те же два случая, что и для горизонтальных отстойников. Площадь зоны осаждения отстойника  $A_{B.O.}$ , м<sup>2</sup>, должна соответствовать значению:

$$A_{B.O.} = \frac{\alpha q}{3,6U_p}, \quad (1.6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент объемного использования, принимаемый 1,3–1,5 (нижний предел – при  $D/H = 1$ , верхний – при  $D/H = 1,5$ ,  $D$  и  $H$  – диаметр и высота вертикальной части отстойника);

$U_p$  – расчетная скорость восходящего потока, мм/с, (0,4–6 м/с);  
 $q$  – расход воды, поступающий на отстойник, м<sup>3</sup>/с.

При размещении в зоне осаждения тонкослойных блоков площадь зоны осаждения увеличивается. Как показывает опыт эксплуатации вертикальных отстойников, при наличии указанных выше скоростях восходящего потока основное количество коагулированной взвеси осаждается в отстойнике. Это объясняется тем, что в медленно восходящем потоке воды коагулированная взвесь, постепенно агломерируясь, достигает таких размеров, что скорость ее падения становится больше скорости восходящего потока.

В вертикальном отстойнике при наличии конусообразного днища и отражательного щита (рис. 1.4) выпуск накопившегося и уплотненного осадка может производиться во время работы отстойника.

При найденном диаметре отстойника и заданном угле конусности днища емкость осадочной части является фиксированной. Поэтому ее лишь проверяют по продолжительности работы отстойника  $T_p$ , ч, между выпусками осадка, которая должна быть не менее 6 ч.

Проверку производят по формуле [5]:

$$T_p = \frac{V_{з.н.} \cdot \delta}{q(C_{и} - M_o)}, \quad (1.7)$$

где  $V_{з.н.}$  – объем зоны накопления и уплотнения осадка, м<sup>3</sup>;

$\delta$  – средняя по высоте осадочной части концентрация твердой фазы осадка, г/м<sup>3</sup>, зависящая от мутности исходной воды и продолжительности между сбросами, принимаемая по СНиП;

$C_{и}$  – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей в отстойник, г/м<sup>3</sup>;

$M_o$  – мутность воды, выходящей из отстойника, г/м<sup>3</sup> (8–15).

При числе рабочих отстойников менее шести необходимо предусматривать один резервный отстойник. Высота зоны осаждения вертикального отстойника, которая практически совпадает с его вертикальной частью, составляет 4–5 м, а отношение диаметра к высоте 1,0–1,5.

Период работы отстойника между сбросами осадка должен быть не менее 6 ч, а при мутности обрабатываемой воды свыше 1 г/л – не более 24 ч.

### 1.2.2. Промышленные отстойники

По принципу действия различают аппараты периодического, непрерывного и полунепрерывного действия, причем непрерывно действующие отстойники, в свою очередь, делятся на одноярусные, двухъярусные и многоярусные [1].

*Периодически действующие отстойники* (рис. 1.5) представляют собой низкие бассейны без перемешивающих устройств [6].

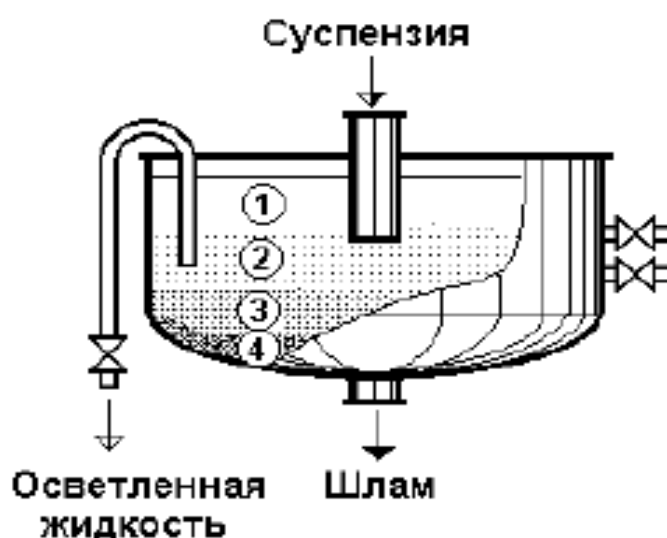


Рис. 1.5. Отстойник периодического действия

Отстойник заполняют суспензией, которая остается в состоянии покоя в течение времени, необходимого для оседания твердых частиц на дно аппарата. После этого осветленную жидкость декантируют, т.е. сливают через сифонную трубу или кран, расположенный выше уровня осадка.

Осадок (шлам) обычно представляет собой густую текучую массу, которую можно слить из бассейна самотеком или откачать насосом после декантации осветленной жидкости. Размеры и форма аппаратов зависят от расхода суспензии, концентрации, размеров, формы и плотности частиц суспензии. Скорость отстаивания существенно зависит от температуры воды, с изменением которой изменяется вязкость жидкости.

В *отстойниках полунепрерывного действия* жидкость поступает и удаляется непрерывно, а шлам выгружается периодически. В принципе любой отстойник периодического действия может работать в полунепрерывном режиме, если его оборудовать устройством удаления шлама без слива жидкости.



Однако существуют и специальные конструкции (рис. 1.6). Суспензия через нижний штуцер подается в аппарат, внутренний объем которого разделен на секции наклонными перегородками, направляющими поток жидкости попеременно то вверх, то вниз. Наличие перегородок увеличивает поверхность осаждения в аппарате. Осадок собирается в конических днищах и периодически удаляется, а осветленная жидкость непрерывно отводится через верхний штуцер.

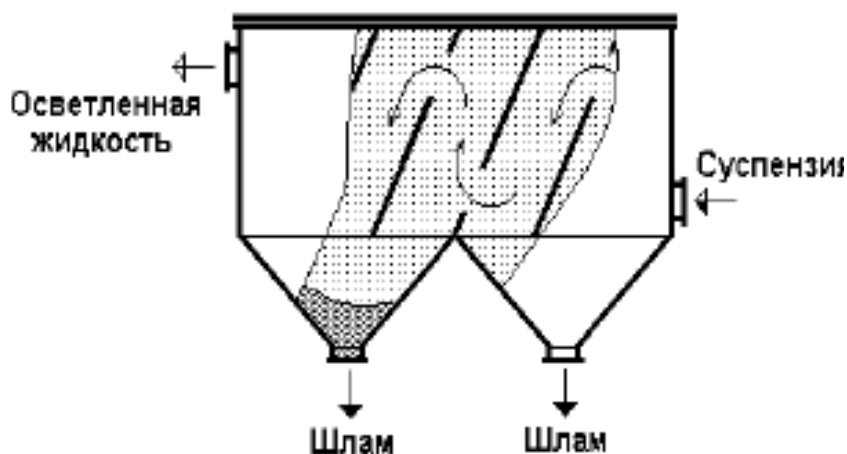


Рис. 1.6. Отстойник с наклонными перегородками

В промышленности наибольшее распространение получили *отстойники непрерывного действия*, например отстойник с гребковой мешалкой (рис. 1.7).

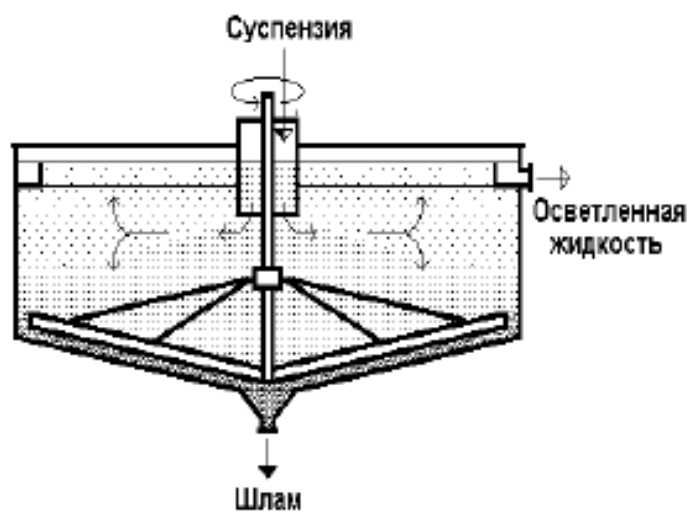


Рис. 1.7. Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой

Суспензия непрерывно подается по центральной трубе в резервуар. Осветленная жидкость переливается в кольцевой желоб и удаляется из резервуара. Шлам в виде сгущенной суспензии с концентрацией твердой фазы от 35 до 55 % удаляется из резервуара с помощью диафрагмового насоса. Гребковые нормализованные отстойники имеют диаметр от 1,8 до 30 м, а в некоторых производствах с большим водоотведением диаметр отстойников достигает 100 м. Работа таких отстойников полностью автоматизирована. Отстойники этого типа характеризуются большой производительностью – до 3000 т осадка в сутки, громоздкостью, большими капитальными затратами и низкими эксплуатационными расходами.

При необходимости установки ряда отстойников с целью экономии площади их размещают один над другим, т. е. применяют многоярусные отстойники, состоящие из нескольких аппаратов, конструктивно объединенных в одном корпусе. Различают многоярусные отстойники *закрытого* и *сбалансированного* типов (рис. 1.8).

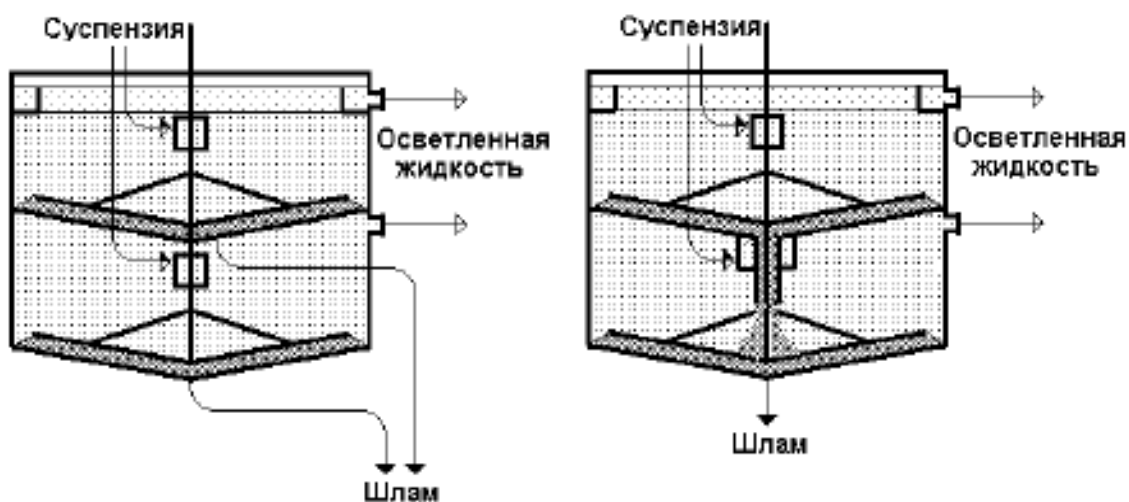


Рис. 1.8. Многоярусные отстойники закрытого (слева) и сбалансированного типов

Простейший многоярусный отстойник представляет собой несколько независимо работающих аппаратов с единым приводом для всех мешалок. Подача суспензии, слив осветленной жидкости и выгрузка шлама производятся в каждом ярусе независимо.

Многоярусные отстойники сбалансированного или уравновешенного типа, в отличие от отстойников закрытого типа, сообщаются между собой: шлам из верхнего яруса через специальный стакан самотеком поступает в слой сгущенной суспензии яруса, расположенного ниже. Суспензия через распределительное устройство подается одновременно на все ярусы.

Осветленная жидкость с каждого яруса выводится через отдельный патрубок и поступает в общий коллектор. Шлам скапливается на нижнем ярусе, откуда и удаляется.

В отстойниках закрытого типа днище каждого яруса воспринимает весь вес находящейся на этом ярусе суспензии, а у отстойников сбалансированного типа всю нагрузку воспринимает только днище нижнего яруса, что делает конструкцию в целом более легкой. Кроме того, в отстойниках закрытого типа вал мешалки между ярусами проходит через сальниковое уплотнение, работающее в тяжелом режиме и быстро изнашивающееся. В отстойниках сбалансированного типа такие уплотнения не требуются.

Помимо многоярусных отстойников большая поверхность осаждения достигается в *отстойниках непрерывного действия с коническими полками* (рис. 1.9).

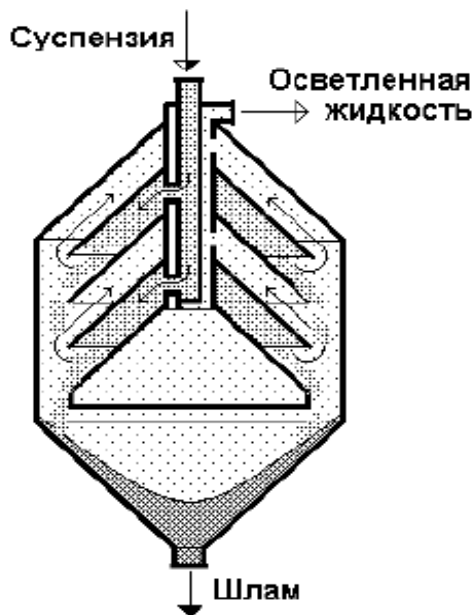


Рис. 1.9. Отстойник с коническими полками

Разделяемая суспензия подается через центральный верхний штуцер и распределяется между коническими полками (через одну), на поверхности которых происходит осаждение твердых частиц. Осевшие частицы сползают по наклонным полкам и перемещаются вниз к штуцеру для удаления шлама. Осветленная жидкость отводится по каналам между полками и выводится из аппарата через боковой штуцер.

Достоинствами этого аппарата являются небольшие габаритные размеры при высокой площади отстаивания, отсутствие движущихся частей и простота обслуживания.

В практике водоподготовки для предварительного осветления воды перед поступлением ее на скорые фильтры применяют горизонтальные, вертикальные, радиальные и тонкослойные по конструкции отстойники.

*Непрерывно действующий отстойник для разделения эмульсий* показан на рис. 1.10. Он представляет собой горизонтальный резервуар, внутри которого против входного штуцера 1 установлена перфорированная отбойная перегородка 2. Она служит для предотвращения возмущений жидкости струей поступающей эмульсии. Поперечное сечение отстойника выбирают таким, чтобы движение жидкости в корпусе аппарата было ламинарным или близким к нему (скорость – несколько мм/с), что способствует ускорению отстаивания. Легкая жидкая фаза удаляется из аппарата по трубопроводу 3, тяжелая – по трубопроводу 4. На последнем имеется устройство 5 для разрыва сифона, предупреждающее полное опорожнение резервуара.

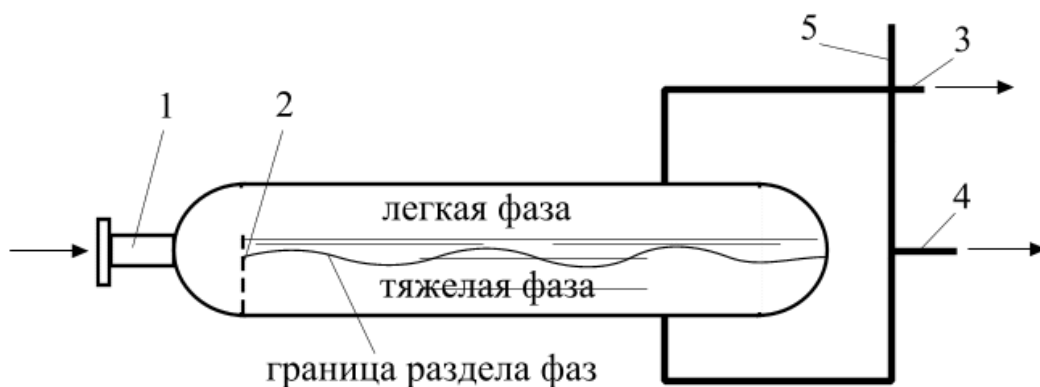


Рис. 1.10. Отстойник непрерывного действия для разделения эмульсий:  
 1 – штуцер для подвода эмульсии; 2 – перфорированная перегородка;  
 3 – трубопровод для отвода легкой фазы; 4 – трубопровод для отвода тяжелой фазы;  
 5 – устройство для разрыва сифона

### 1.2.3. Тонкослойные отстойники

Сепарация дисперсной фазы в гравитационных отстойниках является наиболее простым в аппаратном оформлении процессом. Однако при использовании в качестве отстойников полых емкостей эффективность процесса разделения ограничивается целым рядом факторов.

Экспериментальные и численные исследования выделения нефтепродуктов и других примесей в отстойниках показали, что поток в зоне выделения частиц не является ламинарным даже при низких значениях критерия Рейнольдса [7, 8]. Основными причинами этого являются:

- перепады температур в различных частях аппарата;
- неравномерность поля концентрации дисперсной фазы в различных его частях;
- неравномерность подвода сплошной фазы по поперечному сечению отстойника и отвода очищенной жидкости из него;
- наличие и работа устройств для отвода фаз;
- различные конструктивные неоднородности в виде технологических перегородок, люков, патрубков и др.

Так, неравномерность температурного поля и наличие в разделяемой смеси тяжелых примесей приводит к образованию в отстойнике зон с плотностью среды, отличающейся от средней ее плотности в объеме отстойника, что приводит к возникновению конвективных токов. Интенсивность конвективных токов и геометрия охватываемых ими зон находятся в прямой зависимости от неравномерности состава и температуры жидкости, размеров отстойника и усиливается при наличии источников подогрева в зоне выделения дисперсной фазы. Сосредоточенные отвод и сплошной подвод создают собственные устойчивые вихревые зоны. На эффект перемешивания от сосредоточенных подводов и отводов жидкости накладываются неблагоприятные эффекты конвективных потоков, гидродинамических неравномерностей и др. Все эти факторы приводят к перемешиванию в отстойниках и выравниванию концентрации дисперсной фазы по глубине слоя. Снижение эффективности выделения частиц будет тем значительней, чем меньше разность плотностей сплошной и дисперсной фаз.

Проведенный численный анализ структуры потока в пустотелых отстойниках выявил необходимость их модернизации с целью повышения однородности поля скорости. Одним из способов выравнивания поля скорости является ввод потока в направлении, противоположном основному направлению движения среды в аппарате (рис. 1.11).

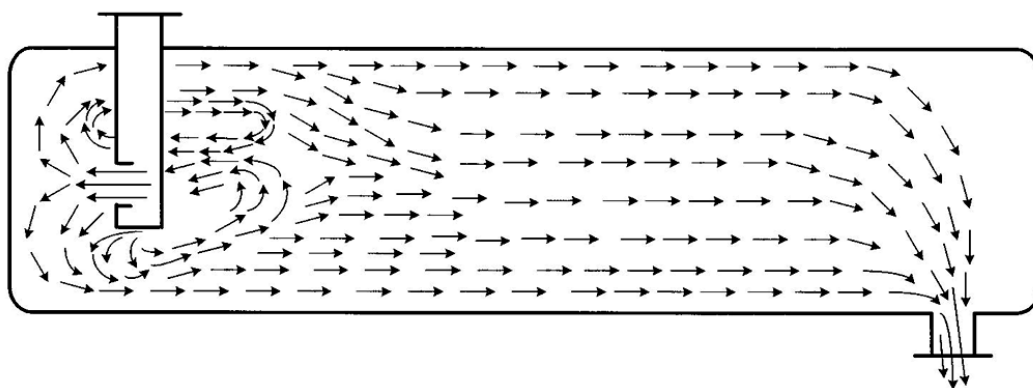


Рис. 1.11. Ввод среды через длинный патрубок в направлении, противоположном основному направлению движения среды в аппарате

Здесь исходная среда вводится через длинный патрубок в направлении, противоположном основному направлению движения среды в аппарате. Поток отражается от стенки аппарата и формируется достаточно однородное поле скорости.

Рекомендованный способ ввода потока позволяет сформировать однородное поле скорости в основном объеме аппарата, расположенном правее за входной трубой. При этом существенная зона циркуляции возникает лишь слева от входной трубы. В других сечениях векторное поле скорости имеет вполне аналогичный вид, демонстрирующий достаточно однородное распределение и относительно малый размер циркуляционных зон. Таким образом, проведенные исследования выявили крайнюю неоднородность поля скорости в аппарате старой конструкции, и подтвердили то, что рациональным техническим решением проблемы является реконструкция аппарата путем изменения способа ввода исходного потока. При этом жидкость, вводимая в направлении, противоположном основному направлению движения в аппарате, отражаясь от крышки, формирует достаточно однородные профили скорости в основном объеме.

Применение тонкослойных отстойников позволяет интенсифицировать процесс осветления воды осаждением воды, на 60 % уменьшить площадь отстойников и на 20–30 % повысить эффект обработки воды по сравнению с горизонтальными отстойниками. Производительность тонкослойных отстойников не лимитирована [5].

Интенсифицировать работу уже существующих сооружений можно с помощью устройства в отстойных сооружениях тонкослойных модулей.

Исследования Сыроватского А.А. и Гарбуза С.П. (Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры) показали, что использование данной технологии позволяет сократить эффективное время отстаивания с 3 часов до 30 мин и повысить эффект задержания загрязнений до 80–90 %.

Существуют трубчатые и полочные тонкослойные отстойники непрерывного и циклического действия. В зависимости от направления движения отстаиваемой жидкости существуют прямоточные, противоточные, поперечные и комбинированные тонкослойные отстойники. В прямоточных – направление движения отстаиваемой жидкости совпадает с направлением выпадения осадка, в противоточных – жидкость движется в противоположном направлении. В поперечных – движение жидкости горизонтально, а тонкослойные элементы расположены под углом к горизонтальной плоскости.

Отстойники циклического действия (рис. 1.12) характеризуются небольшим наклоном секций  $\alpha = 15\text{--}300$ . Существуют трубчатые и полочные тонкослойные отстойники непрерывного и циклического действия. В зависимости от направления движения отстаиваемой жидкости существуют прямоточные, противоточные, поперечные и комбинированные тонкослойные отстойники. В прямоточных – направление движения отстаиваемой жидкости совпадает с направлением выпадения осадка, в противоточных – жидкость движется в противоположном направлении. В поперечных – движение жидкости горизонтально, а тонкослойные элементы расположены под углом к горизонтальной плоскости.

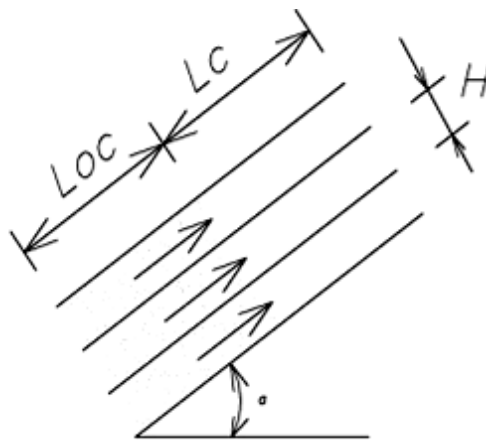


Рис. 1.12. Отстойник циклического действия

В таких отстойниках наблюдается зона накопления осадка  $L_{oc}$ , длина которой во многом зависит от угла наклона и длина отстойной секции –  $L_c$ . Осадок, который накопился между элементами, удаляется, как правило, промывкой обратным током осветленной жидкости. Эффективность работы отстойников циклического действия значительно выше других конструкций тонкослойных модулей за счет небольшой высоты осаждения взвеси. Однако, вследствие интенсивного накопления осадка внутри секций, область использования данных отстойников несколько сужается. Поэтому их применяют для осветления вод от оседающих примесей, когда их концентрации имеют невысокие значения.

В таких отстойниках наблюдается зона накопления осадка  $L_{oc}$ , длина которой во многом зависит от угла наклона и длина отстойной секции –  $L_c$ . Осадок, который накопился между элементами, удаляется, как правило, промывкой обратным током осветленной жидкости. Эффективность работы отстойников циклического действия значительно выше других

конструкций тонкослойных модулей за счет небольшой высоты осаждения взвеси. Однако, вследствие интенсивного накопления осадка внутри секций, область использования данных отстойников несколько сужается. Поэтому их применяют для осветления вод от оседающих примесей, когда их концентрации имеют невысокие значения.

Отстойники непрерывного действия (рис. 1.13) лишены такого недостатка, как наличие зоны накопления осадка, поэтому в них зона отстойной зоны равна длине тонкослойного элемента  $L_c$ .

Тонкослойные отстойники с прямым наклоном секций лучше всего использовать при очистке жидкостей, загрязненных преимущественно всплывающими примесями (например, нефтепродуктами) и сравнительно небольшим количеством малых оседающих частиц. Угол наклона полок  $\alpha$  принимается от 35 до 50°, расстояние между ними  $H = 25-100$  мм.

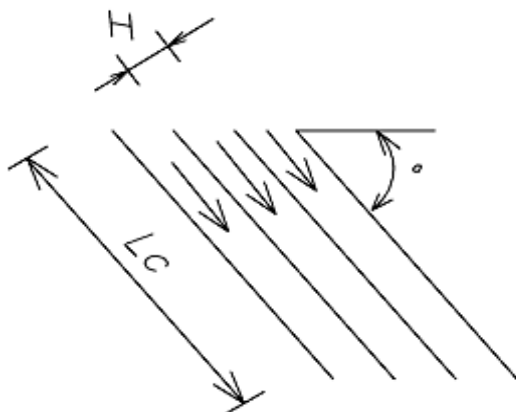


Рис. 1.13. Отстойник непрерывного действия с прямым наклоном секций

В таких отстойниках создаются благоприятные условия для удаления из них осадка, так как поток жидкости, совпадая с направлением сползания осадка, способствует его движению.

В отстойниках с обратным током (рис. 1.14) угол наклона полок  $\alpha$  уже больше – 45–60°, расстояние  $H$  между полками также может увеличиваться из-за повышения вероятности заполнения осадком межполочного пространства, что может приводить к увеличению скорости потока, а, следовательно, и к нарушению ламинарного режима, необходимого для нормальной работы отстойных сооружений. Поэтому данный тип тонкослойных отстойников целесообразно применять для очистки вод, в загрязнении которых преобладают оседающие грубодисперсные примеси невысокой концентрации и гидравлической крупности.



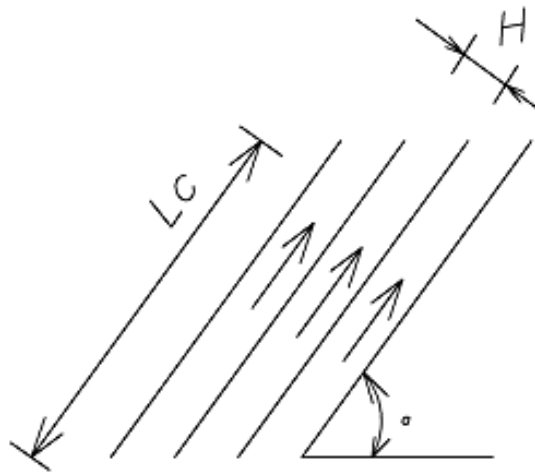


Рис. 1.14. Отстойник непрерывного действия с обратным наклоном полок

В отстойниках с поперечным наклоном секций (рис. 1.15), как правило, входное сечение перпендикулярно направлению движения потока, а сползание выпавшего осадка обеспечивается за счет наклона полок к горизонту под углом  $\beta$ , принимаемым от  $45^\circ$  до  $600^\circ$ . Данные отстойники являются универсальными и пригодны для выделения как всплывающих, так и оседающих примесей.

Тонкослойные элементы (модули) по геометрии поперечного сечения можно разделить на пластинчатые и трубчатые. Последние имеют круглую, квадратную, шестиугольную и ромбовидную форму.

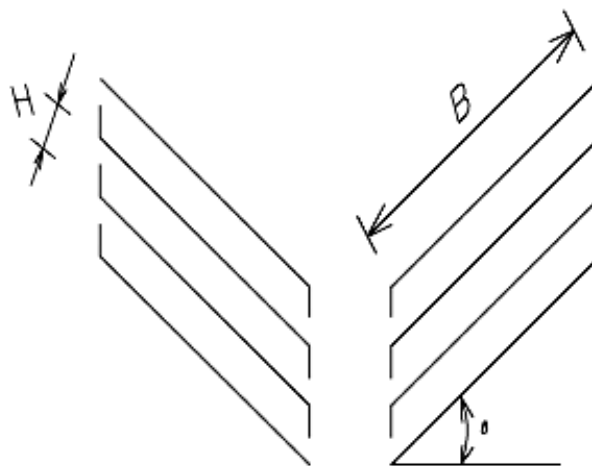


Рис. 1.15. Отстойник непрерывного действия с поперечным наклоном секций

Для изготовления тонкослойных элементов используют стекло, оцинкованное железо, полиэтиленовую пленку, полиэтиленовые профилированные листы, полипропилен, винипласт, полихлорвиниловый и полистирольный пластик, армированную полихлорвиниловую пленку и другие материалы.

Рекомендуемая скорость потока жидкости в тонкослойных элементах принимается из условия ламинарного течения среды между пластинами отстойника в пределах от 1 до 10 мм/с [9]. Расстояние между пластинами в тонкослойном пластинчатом отстойнике – от 20 до 150–200 мм [9]. Оптимальная величина этого расстояния зависит от концентрации дисперсной фазы и ее свойств. Величина этого параметра влияет на расчетную длину тонкослойного элемента.

Для трубчатых отстойников диаметр труб составляет от 25 до 100 мм. Отношение длины к диаметру трубы принимают равным 10–20 при угле наклона не более  $40^\circ$ . Оптимальный угол наклона тонкослойных элементов, в зависимости от вида и концентрации примесей, находится, как правило, в интервале  $45\text{--}60^\circ$  [9]. Процесс тонкослойного отстаивания во многом зависит от гидродинамики двухфазного потока и характера движения осадка по поверхности тонкослойных элементов.

Основной недостаток конструкций блоков перекрестной схемы заключается в перерасходе материала пластин, т. к. для избежания прогиба пластин в блоке, в целях сохранения их параллельности и угла сползания осадка, они принимаются гораздо большей толщины, чем это требуется по технологии процесса.

Использование гофрированного материала или листов с ребрами жесткости (рис. 1.16) уменьшает живое сечение яруса или приводит к вынужденному увеличению высоты.

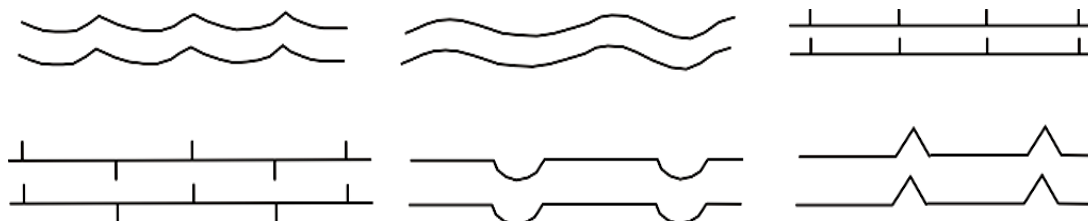


Рис. 1.16. Конструкции тонкослойных блоков, работающих по перекрестной схеме

Представляет интерес конструкция тонкослойного отстойника (рис. 1.17), в котором тонкий слой создается гофрированными листами, расположенными вертикально.

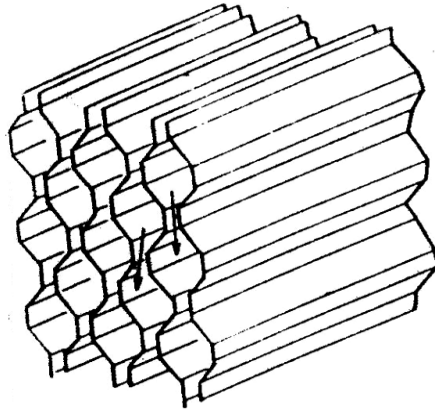


Рис. 1.17. Блок пластин тонкослойного отстойника с гофрированными листами

Процесс отстаивания происходит в расширенном объеме между соседними гофрами. Осадок, выпадающий на наклонную часть гофр, сползает в щель между листами. В эту же щель попадают частицы, оседающие в этом объеме и не попавшие на стенку гофра. В щели создаются условия стесненного осаждения, способствующие агломерации частиц выделившегося осадка. Попадая в нижний расширенный объем между гофрированными листами, процесс осаждения частиц ускорится.

Недостатком такой конструкции, помимо склонности к загрязнению, является возможность повторного перемешивания фаз в узких зазорах между пластинами.

Для уменьшения турбулентности потоков и предотвращения взмучивания осаждаемой взвеси создан и внедрен в промышленность усовершенствованный тонкослойный отстойник, в котором под основным блоком наклонных пластин установлен дополнительный блок вертикальных пластин. Это простое устройство позволяет существенно увеличить производительность аппарата.

Имеются технические решения, в которых для оснащения тонкослойных отстойников предлагаются блоки, состоящие из параллельных листов, имеющих поперечные ребра. Причем листы соединены так, что образующиеся каналы в соседних слоях направлены в разные стороны.

Конструкции блоков тонкослойных элементов для отстойников, работающих по противоточно-прямоточным схемам, отличаются большим разнообразием [9].

Для обеспечения жесткости пластины могут иметь ребра жесткости или им может быть придана гофрированная форма (рис. 1.18.). Для блоков, как правило, используются пластмассовые листы, но может быть использован и металл.

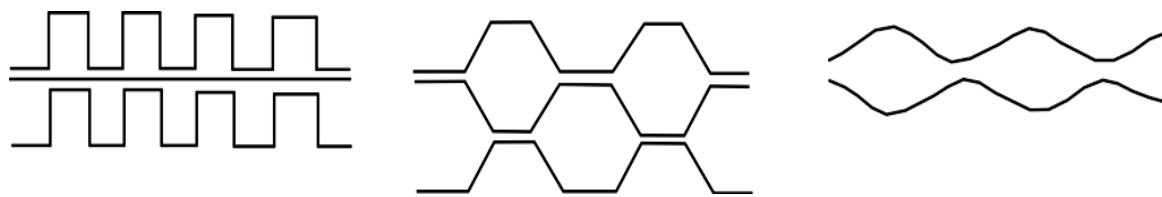


Рис. 1.18. Форма пластин для трубчатых отстойников

Тонкослойные отстойники таких конструкций получили название трубчатых. Одним из достоинств этих отстойников является возможность использования в трубчатых блоках тонкого пленочного материала.

На рис. 1.19 показаны возможности различного расположения гофрированных листов в трубчатых блоках. К недостаткам конструкций можно отнести перерасход используемого материала в местах соединения листов между собой, особенно в случае, когда между гофрированными листами укладывается плоский лист (рис. 1.19, а).

С целью экономии материала пластин и решения вопроса стыковки предлагается множество вариантов стыковочных узлов. Это в свою очередь влечет изменение формы и насадок машин и агрегатов, производящих пластмассовый лист для тонкослойных отстойников, т. к. для трубчатых отстойников, как правило, используется пластмасса. Схемы узлов достаточно сложны в изготовлении; из них «з» (рис. 1.19) наиболее простая и применена в конструкции трубчатого отстойника, разработанного Дон УГИ.

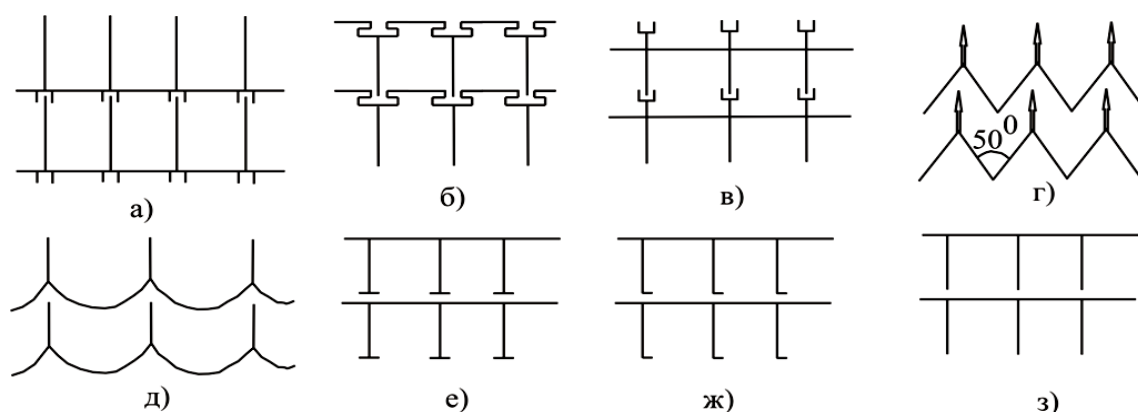


Рис. 1.19. Различные варианты стыковки пластин в трубчатых блоках

Существуют конструкции, в которых блок набран из отдельных труб. В этих конструкциях треугольное сечение, образующееся при стыковке трех труб, практически не используется при длительной эксплуатации отстойника, т.к. подвержено быстрому засорению.

Интерес представляет сложная конструкция трубчатого блока, где в трубы вставлена закрученная винтом полоса (рис. 1.20.), которая создает слой отстаивания, равный шагу винта.

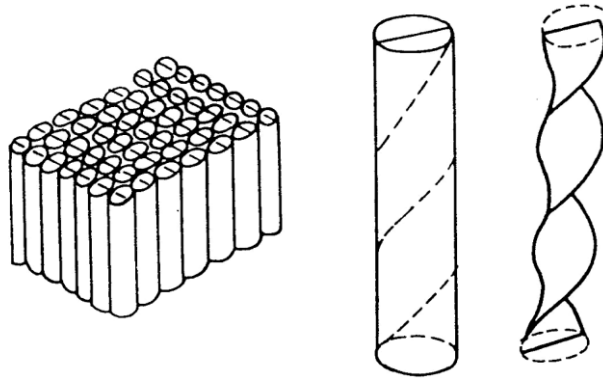


Рис. 1.20. Трубчатый блок с элементами закрутки потока

Кроме того, надо полагать, что при винтовом движении потока будут создаваться условия, повышающие эффективность агломерации. Тем не менее, следует отметить сложность конструкции для рекомендации по ее реализации.

Имеются технические решения, в которых для оборудования отстойников тонкослойными модулями предлагаются блоки, состоящие из параллельных листов, имеющих ребра (рис. 1.21).

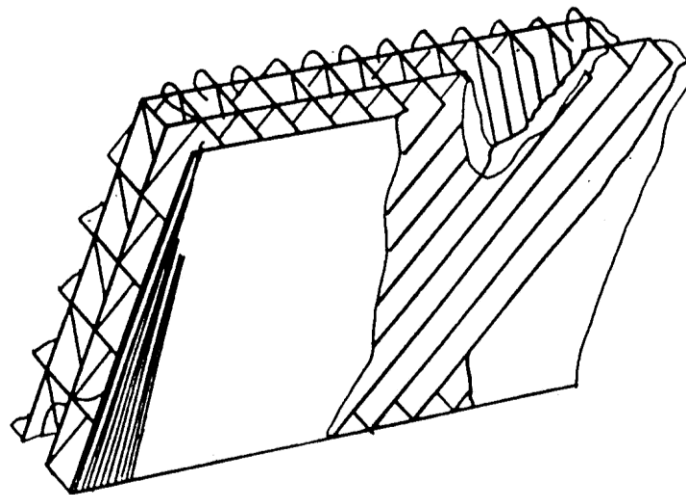


Рис. 1.21. Трубчатый блок с наклонным расположением элементов

Листы соединены так, что если в одном слое образующиеся каналы наклонены в одну сторону, то в последующем в другую. Это придает блоку достаточную жесткость без дополнительного канала.

Отстойники для разделения эмульсий (сепараторы) отличаются от отстойников для разделения суспензий только способом выгрузки отделенной дисперсной фазы. При этом если в качестве дисперсной фазы выступает незагрязненная или слабозагрязненная жидкость, не склонная к загрязнению пластин отстойника, то угол их наклона может быть минимальным, что позволяет при данном расстоянии между пластинами увеличить эффективность сепарации.

### 1.3. Песколовки

Песколовки обычно используют для отделения от сточных вод минеральных частиц крупностью более 200 мкм. Их устанавливают при пропускной способности станции очистки сточных вод более  $100 \text{ м}^3/\text{сут}$ .

Песколовки рассчитывают на максимальный расход сточных вод и проверяют на минимальный приток. К основным типам песколовок, используемых в отечественной практике, относятся следующие [5]:

- горизонтальные песколовки с круговым движением сточной воды,
- горизонтальные песколовки с прямолинейным движением сточной воды,
- тангенциальные песколовки со шнековым пескопромыванием.

Горизонтальные песколовки с круговым движением сточной воды предназначены для удаления песка из производственных сточных вод, имеющих нейтральную или слабощелочную реакцию. Они рассчитаны на производительность  $1400\text{--}70000 \text{ м}^3/\text{сут}$ . Горизонтальные песколовки с прямолинейным движением сточной воды обладают пропускной способностью  $70\text{--}280 \text{ тыс. м}^3/\text{сут}$ . Скорость движения сточных вод составляет при максимальном расходе  $0,3 \text{ м/с}$  и при минимальном  $0,15 \text{ м/с}$ . Схема горизонтальной песколовки с прямолинейным движением сточной воды представлена на рис. 1.22.

Горизонтальная песколовка работает следующим образом. Поток сточной воды поступает в нее через патрубок 1. Осаждающиеся в процессе движения воды твердые частицы скапливаются в шламосборнике 3 и на дне песколовки. Очищенная вода удаляется через патрубок 4 и направляется на дальнейшую переработку. Время пребывания сточных вод в песколовке обычно  $0,5\text{--}2 \text{ мин}$ .

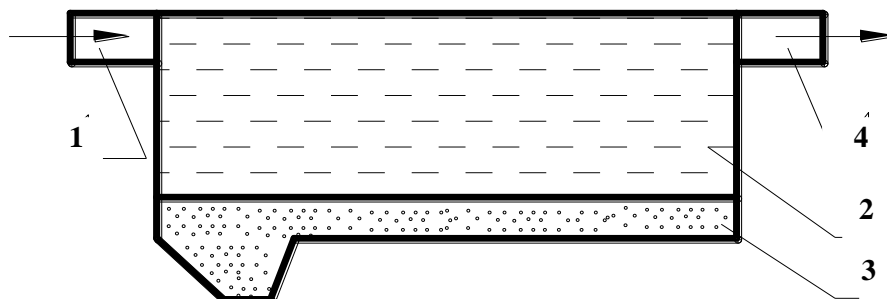


Рис. 1.22. Схема горизонтальной песколовки:  
1 – входной патрубок, 2 – корпус песколовки, 3 – шламосборник (песковый приямок),  
4 – выходной патрубок

Аэрируемые песколовки (рис. 1.23) применяются для выделения содержащихся в сточной воде минеральных частиц гидравлической крупностью 13–18 мм/с.

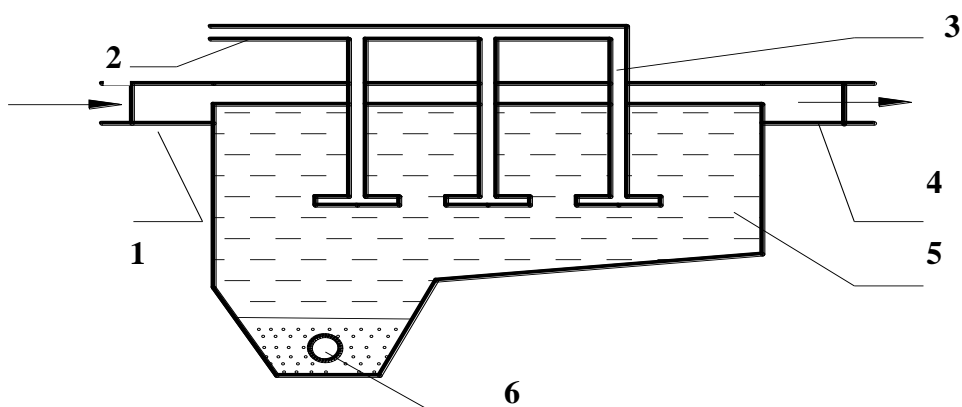


Рис. 1.23. Схема аэрируемой песколовки.  
1 – входной патрубок, 2 – воздуховод, 3 – воздухораспределитель,  
4 – выходной патрубок, 5 – шламосборник (песковый приямок),  
6 – устройство для удаления шлама

Скорость движения сточных вод составляет 0,08–0,12 м/с при максимальном притоке.

Указанные песколовки используют для разделения твердых частиц по фракционному составу или по плотности. Сточная вода поступает в песколовку через патрубок 1. Крупные фракции осаждаются, как и в горизонтальных песколовках. Мелкие фракции, обволакиваясь через воздухораспределители 3, всплывают вверх с помощью сребковых механизмов удаляются с поверхности. Очищенная вода отводится через патрубок 4. Крупные фракции удаляются из шламосборника 5 при помощи устройства для удаления шлама 6.

В последнее время получили распространение тангенциальные песколовки со шнековым пескопромывателем. Сточная вода подается в песколовку тангенциально, но в результате чего возникает ее вращательное движение. Песок, содержащийся в сточной воде, прижимается к стенкам сооружения за счет центробежной силы и отделяется от воды в результате нисходящего течения. При скорости движения сточной воды в подающем лотке 0,7–1,1 м/с задерживается 92–98 % содержащегося в сточной воде песка с гидравлической крупностью 18–24 мм/с.

Вертикальные песколовки имеют прямоугольную или круглую форму, в них сточные воды движутся с вертикальным восходящим потоком со скоростью 0,05 м/с.

Конструкцию песколовки выбирают в зависимости от количества сточных вод, концентрации взвешенных веществ. Наиболее часто используют горизонтальные песколовки.

#### 1.4. Осветлители

Кроме отстойников для механической очистки воды наиболее часто используют осветлители, нефте- и смололовушки.

На водоподготовительных установках (ВПУ) осаждение осуществляется обычно из вертикального потока жидкости, псевдоожижающего образующуюся твердую фазу в осветлителе, – это первая фаза осветления воды, вторая же реализуется с помощью осветительных (механических) фильтров. Осветлители применяют для очистки природных вод и для предварительного осветления сточных вод некоторых производств.

В осветлитель (рис. 1.24) подается подогретая до 30–40 °С исходная вода, прошедшая воздухоотделитель.

Дозируемые растворы реагентов разделяно вводятся в нижнюю часть осветлителя – камеру смешения с помощью тангенциально расположенных сопел. Вращательное движение воды замедляется с помощью вертикальных перфорированных вертикальных перегородок, а выравнивание вертикальной скорости подъема воды производится горизонтальной решеткой.

Выделяющаяся твердая фаза поддерживается водой во взвешенном состоянии, причем максимальный уровень осадка поддерживается на 1,5 м ниже верхнего сборного устройства, в результате чего образуется защитный слой осветленной воды. Основная часть воды, поднимаясь,



проходит слой взвешенной фазы и защитную зону, освобождаясь при этом от взвеси, собирается в кольцевом желобе и выводится из осветлителя. Меньшая часть воды (10–15 %) из верхней части взвешенного слоя вместе с твердой фазой поступает через шламоприемные окна в шламоуплотнитель, в котором из-за отсутствия восходящего движения шлам отстаивается, частично обезвоживается и удаляется по линии постоянной продувки. Освобожденная от осадка вода отводится от шламоуплотнителя и подается по трубопроводу в сборный желоб осветлителя. Для удаления скапливающегося песка и других грубодисперсных примесей в нижней части осветлителя производят периодическую продувку.

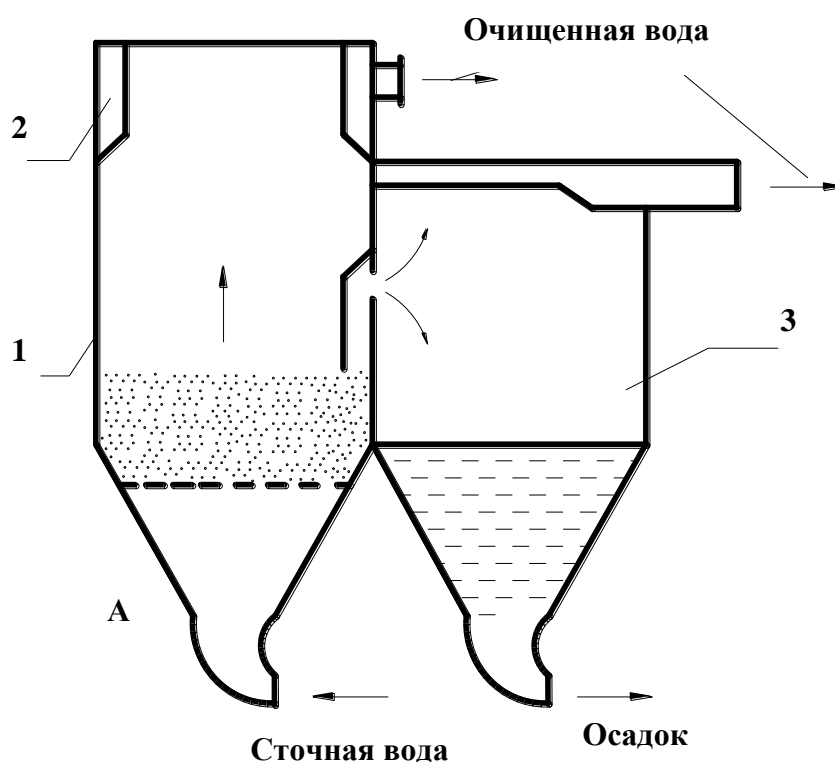


Рис. 1.24. Схема осветлителя: 1 – осветлитель; 2 – желоб; 3 – осадкоуплотнитель

Осветлители с взвешенным слоем обладают по сравнению с осаждением взвеси из горизонтального потока воды в отстойниках следующими преимуществами:

- ускоряется процесс хлопьеобразования за счет каталитического влияния ранее сформированной взвеси интенсификации массообмена;
- улучшаются гидравлические условия отделения твердой фазы;
- снижается расход реагентов вследствие более полного использования адсорбционных свойств осадка.

Конструкции осветлителей весьма разнообразны и отличаются по следующим признакам: 1) по форме рабочей камеры; 2) по наличию или отсутствию дырчатого днища под слоем взвешенного осадка; 3) по способу удаления избыточного осадка; 4) по конструкции и месту расположению осадкоуплотнителей.

Для интенсификации процесса первичного отстаивания труднооседающих веществ на станциях биологической очистки применяют отстойники-осветлители с естественной аэрацией, которые представляют собой вертикальные отстойники с внутренней камерой флокуляции.

### **1.5. Отстойники и нефтеловушки**

Отстойники и нефтеловушки емкостного типа, используемые на предварительных стадиях разделения суспензий, эмульсий и обработки сточных вод, громоздки и малоэффективны. Требуемое время пребывания жидкостей при очистке от тонкодисперсных взвесей и эмульгированных нефтепродуктов достигает нескольких часов, что приводит к неоправданному увеличению габаритов очистных сооружений.

Степень очистки от взвесей и нефтепродуктов в емкостных отстойниках составляет, как правило, не более 50 %. Низкая эффективность очистки сточных вод объясняется несовершенством конструкций, в которых не удается избежать турбулентного перемешивания вследствие конвекционных и плотностных потоков, возникающих из-за температурных перепадов или неравномерного распределения концентрации примесей в объеме очистных сооружений.

Недостатки впускных устройств, распределяющих поток по сечению, не позволяют полностью реализовать объем отстойников и нефтеловушек. Горизонтальная скорость потоков оказывается выше расчетной, следовательно, реальное время пребывания воды на очистных сооружениях может оказаться в 2–3 раза меньше проектного.

Несовершенство горизонтальных емкостных отстойников, имеющих значительную глубину, в которых частицы проходят вертикальный путь, равный глубине отстойника, могут быть существенно снижены на очистных сооружениях с тонкослойным потоком осветляемой воды. Уменьшение высоты слоя отстаивания позволяет сократить время выделения взвешенных веществ из сточных вод, уменьшить перемешивание потока жидкости, вызванное конвекционными токами.

Принцип тонкослойного отстаивания используется при проектировании многоярусных полочных отстойников нефтеловушек. Их рабочий объем разделен по высоте наклонными пластинами на ряд зон отстаивания.

Отстаивание загрязнений в тонких слоях потока жидкости протекает быстро, поскольку путь движения осаждающихся частиц в 10–50 раз короче, чем в емкостных отстойниках. Тонкослойные отстойники являются значительно более компактными очистными сооружениями, требующими меньшей площади размещения. Преимуществом данных очистных сооружений является также то, что введение параллельных пластин в сечение отстойника позволяет равномерно распределить поток воды в начале отстойной части и сохранить это распределение по длине. Поэтому в многоярусных отстойниках коэффициент использования объема гораздо выше, чем в обычных.

Схема тонкослойного отстойника показана на рис. 1.25. Основные характеристики тонкослойных отстойников: отстойник делится наклонными пластинами на ярусы глубиной 45–110 мм; наклон пластин в  $45\text{--}60^\circ$  к горизонту обеспечивает сползание осадка из ярусов в осадкоуплотнитель, а нефтепродуктов на поверхность воды. Устройство ярусов в нефтеловушке одновременно с уменьшением ее объема обеспечивает стабильность потока жидкости и нивелирует возникновения плотностных и температурных течений.

Сравнительные испытания емкостной и тонкослойной нефтеловушек одного объема с концентрацией нефтепродуктов на входе 100 мг/л показали, что концентрация на выходе из многоярусного очистного сооружения достигает 10–15 мг/л, а из нефтеловушки обычной конструкции – 43–50 мг/л. Следовательно, применение тонкослойных отстойников взамен емкостных позволяет повысить эффективность предварительной очистки сточных вод от нефтепродуктов с 55 % до 85 %.



Рис. 1.25. Схема многоярусного отстойника нефтеловушки

В тонкослойных отстойниках и нефтеловушках в зависимости от конструкции возможно осуществить несколько различных схем движения потока жидкости и взвешенных веществ:

- прямоточная, когда поток жидкости и выделяемых из него частицы имеют одно направление;
- противоточная, когда отделяемые частицы движутся против потока жидкости;
- перекрестноточная, когда отделяемые частицы двигаются поперек движения потока жидкости.

Тонкослойный отстойник, представленный на рис. 1.25, является прямоточным по извлекаемым нефтепродуктам и противоточным по оседающим взвешенным веществам.

Конструкция тонкослойного отстойника нефтеловушки с противоточным движением выделенной нефти и потока жидкости представлена на рис. 1.26. Это прямоугольная емкость, разделенная перегородкой 9 на две секции. Над перегородкой расположены блоки из параллельных пластин 3. Шарнирное соединение 7 блока с перегородкой позволяет изменять угол наклона блока для подбора оптимального значения, при котором не происходит зашламливание ярусов. Сточная вода поступает в первую секцию отстойника нефтеловушки через заглубленный трубопровод 2 с насадками 5. При этом из потока выделяется крупнодисперсная нефть.

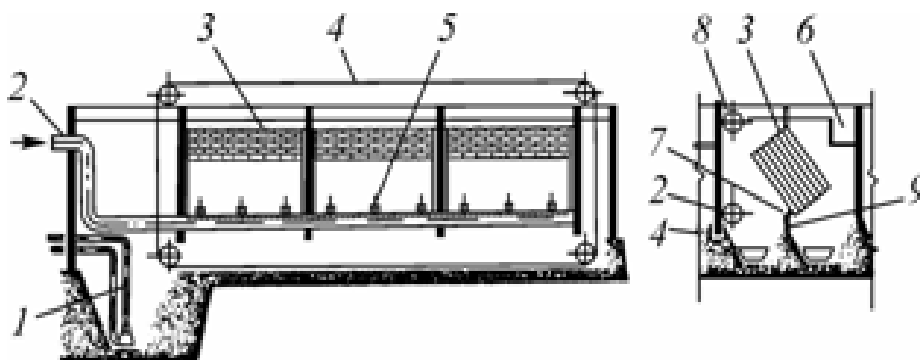


Рис.1.26. Схема многоярусного отстойника нефтеловушки с противоточным движением воды и выделенной нефти:

- 1 – гидроэлеватор для удаления осадка; 2 – заглубленный трубопровод для подачи загрязненной жидкости; 3 – параллельные пластины; 4 – скребковый транспортер; 5 – насадки; 6 – лоток для приема очищенной жидкости; 7 – шарнирное соединение; 8 – нефтесборная труба; 9 – перегородка

Мелкодисперсная нефть, на задержание которой рассчитана нефтеловушка, выделяется при прохождении рабочего потока через блок с параллельными пластинами 3. Задержанная в ярусах нефть движется

против основного потока, выходит из блока и всплывает в первой секции. Рабочий поток, выйдя из блока, поднимается вверх и, переливаясь через водослив в лоток 6 для приема очищенной воды, отводится из очистного сооружения.

На рис. 1.27 схема многоярусного отстойника нефтеловушки конструкции института «Гипростокнефть». Представленная ниже конструкция отстойника работает как противоточная для задержания нефтепродуктов и как прямоточная для задержания взвешенных веществ. Осадок, выделенный в первой и второй секциях нефтеловушки, скребковым транспортером 4 сгребается в соответствующие приямки, откуда гидроэлеваторами 1 откачивается на очистные сооружения для последующей обработки. Нефтепродукты, накопившиеся на поверхности, извлекаются из нефтеловушки через трубу 8.

В институте «Гипростокнефть» были спроектированы многоярусные тонкослойные отстойники для очистки сточных вод емкостью  $100 \text{ м}^3$ .

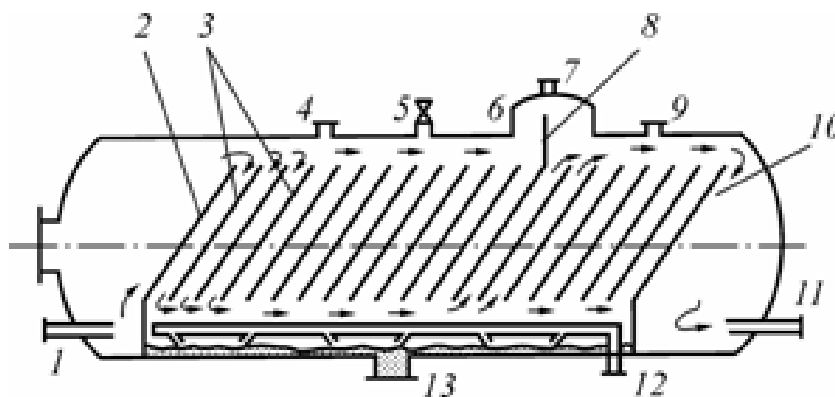


Рис. 1.27. Схема многоярусного отстойника нефтеловушки конструкции института «Гипростокнефть»:

- 1 – патрубок ввода сточной воды; 2, 8, 10 – перегородки; 3 – пластина;
- 4 – штуцер для выпуска воздуха; 5 – предохранительный клапан;
- 6 – нефтесборник; 7 – штуцер для выпуска уловленных нефтепродуктов;
- 9 – штуцер вакуум-клапана; 11 – штуцер для вывода осветленной воды;
- 12 – труба для смыва осадка; 13 – штуцер для вывода шлама

В поперечном сечении отстойники разделены перегородкой на две последовательно работающие камеры. В первой камере при движении воды сверху вниз выделяется основное количество нефтепродуктов и твердых частиц. Во второй камере происходит доочистка воды. В качестве полок применяются листы пластика, установленные под углом  $45^\circ$  к горизонту. Удаление уловленных нефтепродуктов автоматизировано. Осадок из отстойника удаляется периодически путем открытия ручной задвижки.

Конструктивная схема многоярусного отстойника нефтеловушки с перекрестным движением рабочего потока жидкости и выделенного осадка, разработанная и рекомендуемая НИИ ВОДГЕО, изображена на рис. 1.28.

Нефтеловушка изготовлена из железобетонного резервуара 12 прямоугольной формы. Отличительной особенностью является наличие двух зон отстаивания 3 и 5, имеющих самостоятельные приемки 1 для осадка. Сточная вода подается в первую зону грубой очистки 3 точно так же, как и в обычной емкостной нефтеловушке. В этой зоне из воды выделяются крупные капли нефти и песок. Наличие этой зоны позволяет отказаться от применения песколовков на очистных сооружениях.

После извлечения крупнодисперсных загрязнений, поток воды поступает в вертикальный канал пропорционального водораспределительного устройства, служащего для распределения воды по сечению второй зоны. Водораспределительное устройство 4 расположено между первым и вторым приемками. Распределенный по сечению второй зоны поток жидкости поступает в пространство, разделенное параллельными пластинами на ярусы 6. Пластины объединены в блоки 7. Расстояние между блоками и распределительным устройством должно обеспечивать проход скребка.

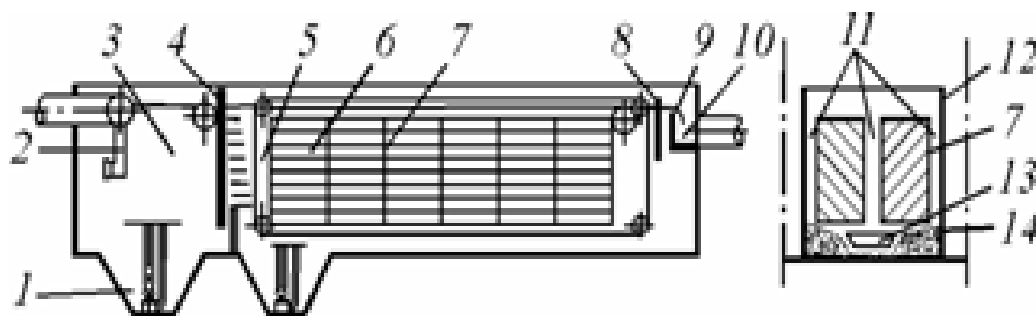


Рис. 1.28. Многоярусный отстойник нефтеловушка с перекрестным движением рабочего потока жидкости и выделенного осадка и нефти:

- 1 – приемок для осадка; 2 – впускное устройство; 3 – зона грубой очистки;
- 4 – распределительное устройство; 5 – зона тонкой очистки; 6 – ярусы;
- 7 – блок пластин; 8 – полупогруженная перегородка; 9 – водослив;
- 10 – водоприемный лоток; 11 – зазоры, перегораживаемые щитками;
- 12 – корпус; 13 – скребок; 14 – лоток

При движении рабочего потока в ярусах выделяются мелкодисперсная нефть и взвешенные вещества. Капли нефти всплывают к верхним пластинам яруса, укрупняются и движутся вверх по образующей яруса к периферии, а затем поднимаются на поверхность воды.

Осадок, выделяющийся в ярусе, по наклонным пластинам сползает к осевой части нефтеловушки. В пространстве между блоками осадок, свалившийся с пластин, оседает в лотке 14, из которого скребковым транспортером 13 перемещается в приямок. Так как выделенный осадок концентрируется практически по оси нефтеловушки, для сбора осадка предусматривают лоток трапецеидальной формы, что значительно упрощает конструкцию скребка и облегчает работу приводного механизма. Осадок, накопившийся в приямках, удаляется гидроэлеватором.

Задержанную в нефтеловушке нефть, как в первой, так и во второй зонах, удаляют через поворотные нефтеприемные трубы. Поток очищенной воды после полочных блоков проходит под полупогруженной перегородкой 8 и переливается через водослив 9 в водоотводящий лоток 10, из которого отводится за пределы очистных сооружений.

При монтаже блоков в объеме нефтеловушки, работающей по перекрестной схеме, пластины соответствующих ярусов в соседних по длине блоках должны строго стыковаться между собой. Рекомендуется даже предусматривать выпуск пластин из каркаса блока. В этом случае пластины в соседних по длине блоках укладываются внахлест. Во всех конструкциях тонкослойных отстойников нефтеловушек пространства между рядом стоящими блоками в центральной части, а также между блоками и боковыми стенками перегородивают легкими съемными щитками, чтобы предотвратить попадание туда рабочего потока и гарантировать его движение только в ярусах.

Перекрестная схема отличается от противоточной более простой конструкцией распределительных устройств и лучшим гидравлическим режимом в межполочном пространстве. Однако при использовании перекрестной схемы для создания жесткости параллельных пластин, объединенных в блоки, требуется увеличивать толщину пластин, что приводит к возрастанию капитальных затрат, а устройство на пластинах гофр или ребер жесткости означает потери полезной высоты отстаивания. При противоточной схеме пространство между параллельными пластинами можно секционировать перегородками, которые увеличивают жесткость блока, и это позволяет изготавливать пластины из тонких листов (толщиной 0,2–0,45 мм). В таких блоках исходный поток делится на отдельные потоки, движущиеся в самостоятельных каналах. Такие отстойники за рубежом получили название трубчатых. Их преимущество заключается в том, что при одинаковых гидравлических нагрузках движение потока в них является более ламинарным, чем при перекрестно-точной схеме, поэтому обеспечивается большая эффективность разделения.

При содержании в воде тяжелых нефтепродуктов ярусы тонкослойного отстойника любой конструкции могут постепенно забиваться шламом. Проектированию многоярусных нефтеловушек должны предшествовать экспериментальный выбор материала пластин и определение угла их наклона.

### 1.6. Определение поверхности осаждения в отстойниках

Отстойники проектируются в расчете на осаждение самых мелких частиц, находящихся в исходной смеси. Теоретические предпосылки расчета осаждения частиц приведены в [8]. Поэтому время пребывания смеси, обрабатываемой в данном аппарате, должно быть больше времени осаждения или в пределе равно времени, необходимому для стесненного осаждения частиц наименьшего размера на дно аппарата с заданной высоты.

Закономерности движения дисперсной фазы рассмотрены в главе 2 (часть 1), где даны расчетные выражения для расчета скорости осаждения [8]. Для расчета отстойников с твердой фазой чаще всего используется следующий подход.

Для описания в критериальной форме процесса осаждения шарообразной частицы в неподвижной неограниченной среде могут быть применены критерии подобия: Архимеда  $Ar$ , Лященко  $Ly$  и Рейнольдса  $Re$ .

Наиболее удобной формой критериальной зависимости является  $Ly = f(Ar)$  [3].

При так называемом ламинарном режиме осаждения, когда критерии имеют значения  $Ar < 3,6$ ;  $Ly < 2 \cdot 10^{-3}$ ;  $Re < 0,2$ , Стоксом теоретически получена следующая формула для скорости осаждения (в м/с) шарообразной частицы:

$$w_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c} \quad (1.8)$$

где  $d$  – диаметр шарообразной частицы, м;  $\rho$  – плотность частицы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_c$  – плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\mu_c$  – динамический коэффициент вязкости среды,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Определение скорости осаждения шарообразной одиночной частицы в неподвижной неограниченной среде по обобщенному методу,



пригодному при любом режиме осаждения, осуществляют следующим образом.

Определяют критерий Архимеда:

$$Ar = Ga \frac{\Delta\rho}{\rho_c} = \frac{Re^2}{Fr} \frac{(\rho - \rho_c)}{\rho_c} = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2}, \quad (1.9)$$

где  $Ga = Re^2/Fr$  – критерий Галилея.

Для осаждения в газовой среде:

$$Ar = d^3 \rho \rho_c g / \mu_c^2. \quad (1.10)$$

По найденному значению критерия  $Ar$  определяют критерий  $Re$  или критерий  $Ly$  (рис. 1.29):

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{Re Fr \rho_c}{(\rho - \rho_c)} = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g} \quad (1.11)$$

либо (если среда – газ)

$$Ly = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c \rho g}. \quad (1.12)$$

Далее вычисляют скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{Re \mu_c}{\rho_c d} \quad (1.13)$$

или

$$w_{oc} = \sqrt[3]{Ly \mu_c (\rho - \rho_c) g / \rho_c^2}. \quad (1.14)$$

Для частицы неправильной формы скорость осаждения определяют тем же путем из критерия Лященко, но с подстановкой в критерий Архимеда вместо  $d$  величины  $d_3$ .

Эквивалентный диаметр  $d_3$  частицы неправильной формы вычисляют как диаметр условного шара, объем которого  $V$  равен объему тела неправильной формы:

$$d_{\text{э}} = \sqrt[3]{6V/\pi} = 1,24\sqrt[3]{M/\rho}, \quad (1.15)$$

где  $M$  – масса частицы, кг.

Диаметр осаждающейся шарообразной частицы при известной скорости осаждения находят обратным путем, т.е. вычисляют сначала критерий Лященко:

$$L_y = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g} \quad (1.16)$$

и по найденному значению  $L_y$  определяют критерий  $Ar$  (рис. 1.29); из последнего по формуле (1.8) вычисляют диаметр шарообразной частицы.

Эквивалентный диаметр осаждающейся частицы твердого тела неправильной формы при известной скорости осаждения определяют таким же путем. Сначала определяют критерий  $L_y$  по формуле (1.15), затем находят значение критерия  $Ar$  для частицы соответствующей формы и вычисляют ее эквивалентный диаметр:

$$d_{\text{э}} = \sqrt[3]{\frac{Ar \mu_c^2}{(\rho - \rho_c) \rho_c g}}. \quad (1.17)$$

Площадь осаждения  $F_{oc}$  (в  $\text{м}^2$ ) отстойника для суспензии (взвесей) определяется по формуле:

$$F_{oc} = V / w'_{oc}, \quad (1.18)$$

где  $V$  – объемный расход жидкости, проходящей через аппарат параллельно поверхности осаждения,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $w'_{oc}$  – средняя расчетная скорость осаждения частиц,  $\text{м}/\text{с}$ .

Отношение средней расчетной скорости стесненного осаждения частиц  $w'_{oc}$  к скорости осаждения одиночной частицы  $w_{oc}$  зависит от объемной концентрации суспензии. При ориентировочных расчетах, учитывая приближенное отличие реальных условий осаждения от теоретических (стесненность осаждения, форма частиц, движение среды), среднюю расчетную скорость осаждения часто принимают равной половине теоретической скорости осаждения одиночной шарообразной частицы:

$$w'_{oc} = 0,5w_{oc} \quad (1.19)$$

В применении к отстойнику непрерывного действия для отстаивания суспензий формула (1.11) принимает вид:

$$F = \frac{G_H \left( 1 - \frac{c_H}{c_{сг}} \right)}{\rho_c w_{oc}} \quad (1.20)$$

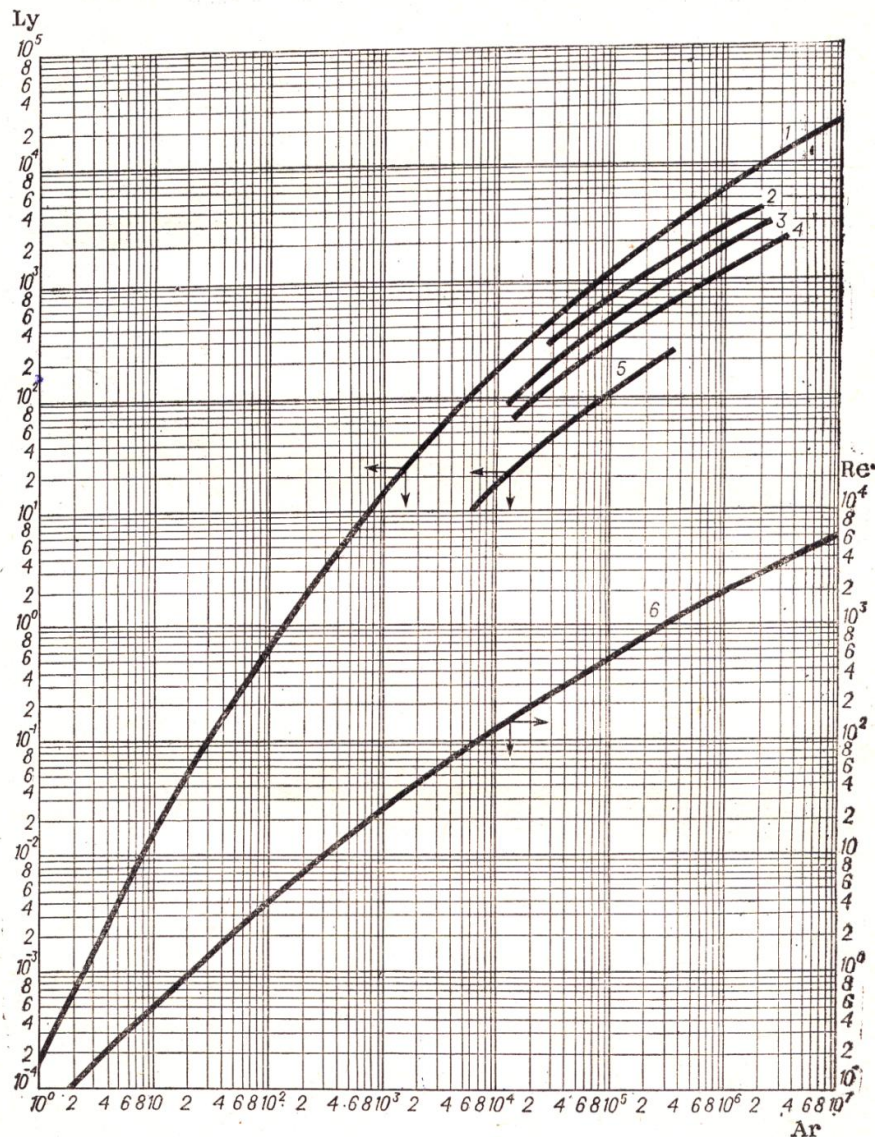


Рис. 1.29. Зависимость критериев Re и Ly от критерия Ar для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде:  
1 и 6 – шарообразные частицы; 2 – округленные частицы; 3 – угловатые частицы; 4 – продолговатые частицы; 5 – пластинчатые

или

$$F_{oc} = \frac{V_0(\chi_{сг} - \chi_n)}{w_{oc}\chi_{сг}}, \quad (1.21)$$

где  $F_{oc}$  – площадь осаждения отстойника, м<sup>2</sup>;  $G_n$  – массовый расход начальной (разбавленной) суспензии, кг/с;  $c_n$  – массовая концентрация твердой фазы в сгущенной суспензии, кг/кг;  $c_{сг}$  – массовая концентрация твердой фазы в осветленной суспензии (шламе), кг/кг;  $\rho_c$  – плотность осветленной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $V_0$  – объемный расход жидкой фазы, содержащейся в начальной суспензии, м<sup>3</sup>/с;  $x_n$  и  $x_{сг}$  – концентрации начальной суспензии и шлама (кг твердой фазы/кг жидкой фазы).

При выводе уравнения (1.19) не учитывалась неравномерность движения жидкости по всей площади отстойника – от точки ввода ее в аппарат до переливного устройства. В связи с этим допускалось, что в аппарате отсутствуют застойные зоны и не происходит вихреобразования жидкости, вызванного неравномерностью осаждения частиц. Как показывает опыт, эти явления уменьшают скорость отстаивания в промышленных отстойниках. Кроме того, по мере движения разделяемой фазы в ней постепенно увеличивается и, следовательно, скорость отстаивания постепенно уменьшается. Учесть количественное влияние указанных факторов на скорость отстаивания пока не представляется возможным. Поэтому в инженерных расчетах поверхность отстойника, определенную по уравнению (1.20), обычно увеличивается, согласно экспериментальным данным, ориентировочно на 30–35 %.

### 1.7. Методика расчета тонкослойных отстойников

Расчет технологических и конструктивных параметров, как целого сооружения, так и отдельных тонкослойных элементов приведен в [5, 7].

Исходными данными для расчета тонкослойных отстойников служат:  $Q$  – расход производственной сточной воды, м<sup>3</sup>/с;  $u$  – наименьшая гидравлическая крупность, подлежащих содержанию частиц, мм/с;  $C_1, C_2$  – концентрация взвешенных веществ соответственно в исходной и очищенной воде, мг/л;  $t$  – продолжительность накопления осадка (или всплывающих примесей);  $P$  – влажность осадка (или всплывающих частиц) перед выпуском из отстойника, %;  $\rho$  – плотность осадка (или всплывающих примесей) при влажности  $P$ , кг/м<sup>3</sup>.

Отстойники проектируются в расчете на осаждение самых мелких частиц, находящихся в исходной смеси. Поэтому время пребывания смеси, обрабатываемой в данном аппарате, должно быть больше наибольшего времени осаждения или в пределе равном времени, необходимому для стесненного осаждения частиц наименьшего размера на дно аппарата с заданной высоты.

При расчете многоярусных отстойников общую расчетную поверхность осаждения делят поровну между ярусами.

В концентрированных эмульсиях совместное относительное движение дисперсных частиц  $U(r, \alpha)$  из-за взаимодействия их между собой и со сплошной средой затормаживается в соответствии с концентрационной зависимостью:

$$U(r, \alpha) = U(r) \cdot \varphi(\alpha), \quad (1.22)$$

где  $\alpha$  – концентрация дисперсной фазы, численно равная объему капель в единице объема эмульсии.

На основании экспериментальных данных по определению скорости осаждения частиц в концентрированных эмульсиях рекомендована формула:

$$\varphi(\alpha) = (1 - \alpha)^n. \quad (1.23)$$

Из приведенных формул видно, что основное влияние на скорость осаждения капель оказывает разность плотностей фаз эмульсии, диаметр капель и вязкость сплошной среды. Влияние внутренних токов в капле и концентрации дисперсной фазы учитывается с помощью соответствующих добавочных выражений к формуле Стокса.

Обычно процесс отстаивания изучают в статических условиях при неподвижной жидкости

Перенос результатов статических исследований в динамические условия работы проточных устройств, производят с помощью соотношения

$$\tau = \frac{L}{U_{ж}} = \frac{LBH}{Q_{ж}}, \quad (1.24)$$

где  $Q_{ж}$ ,  $U_{ж}$  – расход и средняя скорость движения сплошной фазы вдоль зоны выделения частиц;  $L$ ,  $B$ ,  $H$  – длина, ширина и высота зоны выделения.

При таком переносе предполагается, что поток в зоне выделения частиц ламинарный, профиль скорости потока в поперечном сечении аппарата равномерный и перемешивания сплошной фазы не происходит.

Количество дисперсной фазы, выделяющейся из сплошной фазы в зоне отстоя с частицами радиусом  $r$ , может быть найдено для этого случая по формуле:

$$Q_{vr} = V_{жс} C_0 \frac{W_{ч\tau}}{H}, \quad (1.25)$$

где  $V_{жс}$  – объем сплошной фазы, протекающей за время  $\tau$  через зону отстоя;  $C_0$  – исходная концентрация частиц дисперсной фазы радиусом  $r$ , в объемных долях.

Остаточная концентрация частиц определяется как:

$$C = C_0 \left( 1 - \frac{W_{ч\tau}}{H} \right). \quad (1.26)$$

При расчете тонкослойных пластинчатых отстойников следует учитывать три фактора:

- время осаждения частиц заданного размера  $\tau_{ос}$ ;
- время пребывания жидкости в тонкослойном элементе  $\tau_{преб}$  ( $\tau_{ос} < \tau_{преб}$ );
- наличие ламинарного режима течения жидкости при обязательном сохранении устойчивости потока [9], т. е.:

$$Re = \frac{\upsilon H}{\nu} < 500, \quad (1.27)$$

$$Fr = \frac{\upsilon^2}{g \frac{H}{4}} > 10^{-5}, \quad (1.28)$$

где  $\upsilon$  – скорость движения жидкости в тонкослойном элементе;  $H$  – расстояние между пластинами;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Методики расчета тонкослойных отстойников, как правило, сводятся к определению максимальной скорости движения жидкости  $u_{max}$  ( $u_{min} < u < u_{max}$ ), рабочей длины зоны осаждения  $L$ , т. е. длины тонкослойных элементов, и общего количества ячеек  $n$ . Расстояние между пластинами, их ширина, концентрация взвеси при этом принимаются.

Максимально допустимая скорость движения воды в тонкослойных элементах из условия (1.27) должна быть:

$$u_{\max} \leq 500 \frac{\nu}{H}. \quad (1.29)$$

Для определения значений величин максимальной и минимальной скорости движения жидкости в различных конструкциях тонкослойных отстойников используются формулы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

## Условия для расчета отстойников

Параметр	Тонкослойные отстойники с наклоном элементов			
	продольным			поперечным
	трубчатые		пластинчатые	
	Прямоугольного сечения	круглого сечения		
$Re_{\text{опт}}$	$\frac{\nu H b}{2\nu(H+b)} < 500$	$\frac{\nu H}{4\nu} < 500$	$\frac{\nu H}{2\nu} < 500$	
$\nu_{\max}$	$1000\nu \left( \frac{1}{b} + \frac{1}{H} \right)$	$\frac{2000\nu}{H}$	$\frac{1000\nu}{H}$	
$\nu_{\min}$	$10[u] \cos \alpha + u \sin \alpha$			$\frac{H}{[u] \cos \beta}$

Для тонкослойных элементов горизонтальных и радиальных отстойников скорость движения жидкости рекомендуется принимать  $\nu = 2-10$  мм/с, а для отстойников с восходяще-нисходящем течением жидкости  $\nu = 2-5$  мм/с.

Расчетная длина  $L$  тонкослойных элементов может быть определена по формуле:

$$L = \frac{H\nu}{u \cos \alpha}. \quad (1.30)$$

Гидравлическую крупность частиц следует определять экспериментально путем осаждения взвесей в покое в слое жидкости, равной высоте их осаждения в тонкослойных элементах.

В табл. 1.1.  $b$  – ширина тонкослойного элемента;  $u$  – гидравлическая крупность частиц;  $\alpha$  – угол продольного наклона тонкослойных элементов;  $\beta$  – угол поперечного наклона тонкослойных элементов. Анализ литературных данных и результатов исследований позволили предложить метод расчета тонкослойных отстойников, который сводится к определению его геометрических размеров – длины, ширины и высоты канала – при заданных нагрузке, начальной и конечной концентрации взвеси и её характеристики (дисперсности и плотности). Необходимыми условиями, обеспечивающими надежность работы и стабильность качества осветленной воды, является ламинарный режим течения и устойчивость потока в тонкослойном элементе.

Для каналов прямоугольного сечения, какими являются ячейки тонкослойного отстойника, критическое число Рейнольдса определяется по максимальному значению скорости потока  $W_{\max}$ , то есть:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{W_{\max} 4R}{\nu} \leq 2800, \quad (1.31)$$

откуда скорость потока составит:

$$W_{\max} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \nu}{4R}. \quad (1.32)$$

Устойчивость потока описывается критерием Фруда и для рассматриваемого случая численное значение последнего принимается:

$$\text{Fr}_{\text{кр}} = \frac{W_{\max}^2}{gR} \geq 10^{-5}, \quad (1.33)$$

из которого скорость потока составит:

$$W_{\max} = 0,1\sqrt{R}. \quad (1.34)$$

Из совместного решения уравнений (1.32) и (1.33), получены предельные значения максимальной скорости потока и гидравлического радиуса для ячейки тонкослойного отстойника:

$$W_{\max} \leq 0,412 \text{ см/с}, \quad R \leq 16,9 \text{ см}. \quad (1.35)$$



Отсюда следует, что изменения скорости потока, в пределах которой при заданных геометрических размерах ячейки обеспечиваются одновременно и ламинарный режим течения и устойчивость потока, приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Пределы максимальной скорости потока при различных геометрических размерах ячейки при  $t = 10^\circ\text{C}$

$H$ , см	$B/H$	$R$ , см	$W_{\max}$		$R < 2800$
			менее см/с	более см/с	
2,5	1	0,62	11,3	0,079	19,7
	2	0,83	8,4	0,091	30
	5	1,04	6,7	0,102	42
	10	1,14	6,1	0,106	49
	20	1,19	5,8	0,109	52
	40	1,22	5,7	0,11	54
5	1	1,25	5,6	0,112	56
	2	1,67	4,2	0,129	58
	5	2,08	3,4	0,144	120
	10	2,27	3	0,15	137
	20	2,38	2,9	0,152	145
	40	2,42	2,85	0,155	150
10	1	2,5	2,8	0,158	158
	2	3,34	2,1	0,182	244
	5	4,16	1,68	0,202	334
	10	4,55	1,53	0,213	390
	20	4,75	1,47	0,218	410
	40	4,85	1,41	0,22	420
20	1	5	1,4	0,224	448
	2	6,67	1,04	0,256	680
	5	8,35	0,84	0,286	950
	10	9,1	0,77	0,3	1090
	20	9,53	0,735	0,31	1180
	40	9,75	0,716	0,313	1220

Рекомендуемые значения скорости потока  
в зависимости от концентрации взвеси

Характеристика суспензии	Концентрация взвеси $C$ , мг/л	Скорость потока $W_{\max} = W_{\text{ср}}$
Слабоконцентрированные	от 50	1,5
Средней концентрации	50–500	1,7
Высокой концентрации	500–5 000	2
Весьма высокой концентрации (осадки пульпы)	от 5 000	2,5

По принятому значению максимальной скорости потока находят геометрические размеры ячейки (без учета толщины сползающего осадка) из равенства:

$$R = \frac{B \cdot H}{2(B + H)}, \quad (1.36)$$

задавшись при этом соотношением  $\frac{B}{H}$ . После этого находят общую высоту ячейки  $H$  с учетом толщины слоя сползающего осадка, равную:

$$H_0 = H + h. \quad (1.37)$$

Тогда удельная нагрузка на ячейку составит:

$$g = W_{\text{ср}} B H = \frac{W_{\max}}{1,5 \div 2,5} B H. \quad (1.38)$$

Общее количество ячеек:

$$n = \frac{Q}{g}. \quad (1.39)$$

При нахождении длины зоны отстаивания  $L$  в расчет необходимо вводить не среднюю, а максимальную скорость потока. Тогда при торцевом впуске суспензии в ячейку длина зоны отстаивания составит:

$$L = W_{\max} \cdot T, \quad (1.40)$$

а при боковом:

$$L = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \beta} + W_{\max} \cdot T. \quad (1.41)$$

Продолжительность отстаивания:

$$T = \frac{H_0}{\cos \alpha \cdot U}. \quad (1.42)$$

### 1.8. Примеры решения задач

**Пример 1.1.** Найти скорость осаждения в воде частиц кварцевого песка шарообразной формы диаметром 0,9 мм, если плотность песка 2650 кг/м<sup>3</sup>, а температура воды 20 °С.

**Решение.** Определяем критерий Ar:

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_c) \rho_c g}{\mu_c^2} = \frac{0,9^3 \cdot 10^{-9} (2650 - 1000) 1000 \cdot 9,81}{(1 \cdot 10^{-3})^2} = 1,18 \cdot 10^4,$$

где для воды  $\mu_c = 1 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

По значению  $Ar = 1,18 \cdot 10^4$  из рис. 1.29 находим  $Re = 140$ .

Скорость осаждения частиц кварцевого песка шарообразной формы диаметром 0,9 мм определяем из выражения:

$$w_{oc} = \frac{Re \mu_c}{d \rho_c} = \frac{140 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,0009 \cdot 1000} = 0,15 \text{ м/с.}$$

**Пример 1.2.** Определить размер наибольших шарообразных частиц мела, которые будут уноситься восходящим потоком воды, идущим со скоростью 0,5 м/с. Температура воды 10 °С, плотность мела 2710 кг/м<sup>3</sup>.

**Решение.** Определяем критерий  $Ly$  по формуле (1.16):

$$Ly = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g} = \frac{0,5^3 \cdot 1000^3 \cdot 10^3}{1,3(2710 - 1000) \cdot 9,81} = 5,72 \cdot 10^3,$$

где для воды при 10 °С  $\mu_c = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

По найденному значению  $L_y = 5,72 \cdot 10^3$  из рис. 1.29 находим  $Re = 1750$ ; затем по формуле (1.13) определяем максимальный диаметр частиц мела, которые будут уноситься водой:

$$d = \frac{Re \mu_c}{w_{oc} \rho_c} = \frac{1750 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 1000} = 4,55 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,55 \text{ мм.}$$

**Пример 1.3.** Найти скорость осаждения в воде при 20 °С частицы свинцового блеска угловатой формы с  $d_{\text{э}} = 1$  мм. Плотность свинцового блеска 7560 кг/м<sup>3</sup>.

**Решение.** Скорость осаждения частиц неправильной формы из критерия  $L_y$ , предварительно определив значение критерия  $Ar$ :

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_c) \rho_c g}{\mu_c^2} = \frac{1^3 \cdot 10^{-9} (7560 - 1000) 1000 \cdot 9,81}{1^2 \cdot 10^{-6}} = 6,44 \cdot 10^4,$$

где  $\mu_c = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

По графику (рис. 1.29) находим для частиц угловатой формы  $L_y = 3,1 \cdot 10^2$ .

Скорость осаждения по формуле (1.14):

$$w_{oc} = \sqrt[3]{L_y \mu_c (\rho - \rho_c) g / \rho_c^2} = \sqrt[3]{3,1 \cdot 10^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} (7560 - 1000) 9,81 / 1000^2} = 0,271 \text{ м/с}$$

**Пример 1.4.** Определить диаметр отстойника для непрерывного осаждения отмученного мела в воде. Производительность отстойника 80 т/ч начальной суспензии, содержащей 8 % масс. CaCO<sub>3</sub>. Диаметр наименьших части, подлежащих осаждению, 35 мкм. Температура суспензии 15 °С. Влажность шлама 70 %. Плотность мела 2710 кг/м<sup>3</sup>.

**Решение.** Чтобы определить диаметр отстойника, надо вычислить необходимую площадь осаждения по формуле (1.8), для чего предварительно находят скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{d^2 (\rho - \rho_c) g}{18 \mu_c} = \frac{3,5^2 \cdot 10^{-10} (2710 - 1000) 9,81}{18 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,001 \text{ м/с,}$$

где  $\mu_c = 1,14 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

Проверим значение критерия Re:

$$Re = \frac{w_{oc} d \rho_c}{\mu_c} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,0307 < 0,2.$$

Действительная скорость осаждения:

$$w'_{oc} = 0,5 \cdot 0,001 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Площадь отстойника:

$$F_{oc} = \frac{G_H \left(1 - \frac{c_H}{c_K}\right)}{3600 \rho_c w'_{oc}} = \frac{80 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{8}{30}\right)}{3600 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ м}^2.$$

Диаметр отстойника:

$$D = \sqrt{32,5 / 0,785} = 6,4 \text{ м.}$$

**Пример 1.5.** Определить конструктивные размеры тонкослойного отстойника, если расход  $Q_{сут} = 1500 \text{ м}^3$ ; коэффициент часовой неравномерности  $K_{ч.н.} = 2,5$ ; концентрация взвеси  $C_1 = 350 \text{ мг/л}$ ; эффект очистки 99 %; механические примеси – хлопья гидроксида алюминия  $Al(OH)_3$  плотностью  $\rho = 1,02 \text{ г/см}^3$ ; гидравлическая крупность частиц  $U = 0,05 \text{ см/с}$ ; температура жидкости  $t_{ж} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ; опорожнение осадка влажностью 98,5 % – раз в неделю; схема отстойника – противоточная (рис. 1.30).

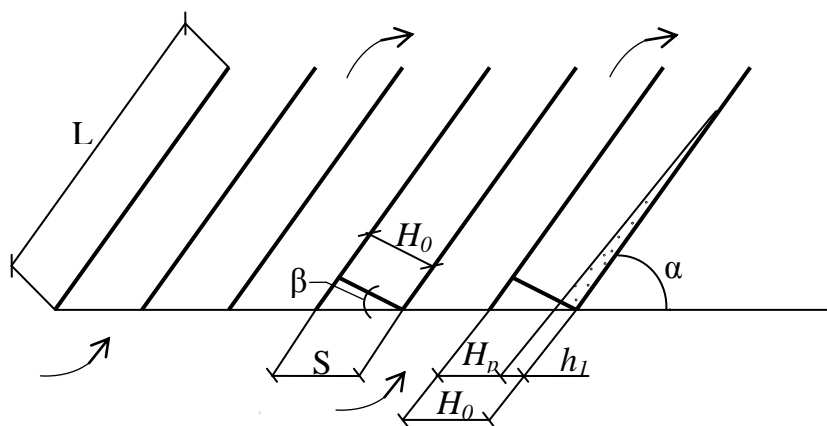


Рис. 1.30. Схема работы отстойника

**Решение.** Примем угол наклона ячейки  $\alpha \leq 50^\circ$ , рабочую высоту ячейки  $H_p = 25$  мм.

Учитывая волновой характер сползания осадка (при угле наклона элемента более  $30^\circ$ ), высота канала должна быть несколько больше максимальной толщины осадка, которая в створе вальца волны у неструктурированных осадков достигает 6 мм, а у структурированных (какими являются осадки гидроокисей металлов) в 2,5–3 раза больше.

Таким образом, высота ячейки по нормали составит:

$$H_0 = H_p + h_1 = 25 + 6 \cdot 2,5 = 40 \text{ мм.}$$

Задавшись шириной ячейки  $B = 100$  см, найдем ее гидравлический радиус по формуле:

$$R = \frac{BH_0}{2(B + H_0)} = \frac{100 \cdot 4}{2(100 + 4)} = 1,92 \text{ см.}$$

Минимальная скорость потока принимается из условий его устойчивости:

$$\text{Fr}_{\text{кр}} = \frac{V_{\text{min}}^2}{g \cdot R}, \quad (1)$$

где  $\text{Fr}_{\text{кр}} \geq 10^{-5}$  – критерий Фруда;  $g = 981 \text{ см/с}^2$  – ускорение свободного падения.

Из формулы (1)  $V_{\text{min}} = \sqrt{10^{-5} \cdot 9,81 \cdot 1,92} = 0,14 \text{ см/с.}$

Максимальная скорость потока определяется из условий обеспечения ламинарного режима течения жидкости в ячейке:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = \frac{V_{\text{max}} 4R}{\nu}, \quad (2)$$

где  $\text{Re}_{\text{кр}} = 2800$  – критическое число Рейнольдса для каналов прямоугольного сечения;  $\nu = 0,01308 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  – коэффициент кинематической вязкости для воды при  $t = 10^\circ \text{C.}$

Из формулы (2):

$$V_{\text{max}} = \frac{\text{Re}_{\text{кр}} \cdot \nu}{4R} = \frac{2800 \cdot 0,01308}{4 \cdot 1,92} = 4,77 \text{ см/с.}$$

Учитывая влияние оседающей взвеси на гидравлические условия потока (изменение эпюры скоростей), среднюю скорость потока определяют по формуле:

$$V_{cp} = \frac{V_{max}}{k}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый по таблице, приведенной ниже.

Характеристика суспензии	Концентрация взвеси $C$ , мг/л	$k$
Слабоконцентрированные	от 50	1,5
Средней концентрации	50–500	1,7
Высокой концентрации	500–5 000	2
Весьма высокой концентрации (осадки пульпы)	от 5 000	2,5

При концентрации взвешенных веществ в исходной воде  $C_1 = 350$  мг/л,  $k = 1,7$ .

Удельная нагрузка на ячейку (при отсутствии осадка в ней) определяется по формуле:

$$q = V_{cp} \cdot B \cdot H_p, \quad (4)$$

а их общее количество:

$$n = \frac{Q_{ч}}{q}, \quad (5)$$

где  $Q_{ч}$  – часовой расход сточных вод, м<sup>3</sup>/ч, определяемый по формуле:

$$Q_{ч} = \frac{Q_{сут} \cdot K_{ч.н.}}{24}.$$

$$q_{max} = 3600 \cdot \frac{4,77 \cdot 10^{-2}}{1,7} \cdot 1 \cdot 0,025 = 2,52 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$q_{min} = 3600 \cdot \frac{0,14 \cdot 10^{-2}}{1,7} \cdot 1 \cdot 0,025 = 0,07 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Число ячеек:

$$n_{\max} = \frac{1500 \cdot 2,5}{24 \cdot 2,52} = 62 \text{ шт.};$$

$$n_{\min} = \frac{1500 \cdot 2,5}{24 \cdot 0,07} = 2232 \text{ шт.}$$

Скорость осаждения хлопьев гидроокиси алюминия с учетом фактора стесненности:

$$U_{\text{ст}} = U \cdot \left[ 1 - 2,6 \left( \frac{C_1}{\rho} \right)^{0,5} \right] = 0,05 \left[ 1 - 2,6 \left( \frac{0,00035}{1,02} \right)^{0,5} \right] = 0,047 \text{ см/с.}$$

Продолжительность осаждения в начальный момент отстаивания (осадок ещё не образовался):

$$T = \frac{H_0}{\cos \alpha \cdot U} = \frac{4}{\cos 55^\circ \cdot 0,047} = 150 \text{ с.}$$

Длина зоны отстаивания при торцевом впуске жидкости:

$$L = V \cdot T$$

$$L_{\max} = V_{\max} \cdot T = 4,77 \cdot 150 = 716 \text{ см,}$$

$$L_{\min} = V_{\min} \cdot T = 0,14 \cdot 150 = 21 \text{ см.}$$

Горизонтальное расстояние между пластинами  $S$  равно:

$$S = \frac{H_0}{\cos \beta} = \frac{4}{\cos 35^\circ} = 4,9 \text{ см.}$$

Пластинами может служить оконное стекло толщиной  $\delta = 4$  мм, шириной  $H = 1$  м и длиной  $l$  до 1,2 м. Размеры пакета пластин ( $L \times B \times H$ ) при максимальной скорости потока, длине пластины  $L_{\max} = 716$  см и количестве ячеек в пакете  $n_{\max} = 62$ :

$$7,16 \cdot \cos 55^\circ \times (62 \cdot S + 63 \cdot \delta) \times 1 = 4,11 \times 3,29 \times 1 \text{ м,}$$



Количество пакетов при максимальной скорости потока:

$$n = \frac{L_{\max}}{l} = \frac{716}{120} = 6 \text{ шт.}$$

Размеры пакета пластин при минимальной скорости потока, длине пластины  $L_{\min} = 21$  см и количестве ячеек в пакете  $n_{\min} = 2232$  шт:

$$0,21 \cdot \cos 55^\circ \times (2232 \cdot S = 2233 \cdot \delta) \times 1 = 0,12 \times 118,3 \times 1 \text{ м.}$$

Количество пакетов при минимальной скорости потока:

$$n = \frac{L_{\min}}{l} = \frac{21}{120} = 1 \text{ шт.}$$

### Контрольные вопросы

1. Сущность процесса отстаивания.
2. Классификация отстойников.
3. Назначение песколовки в процессах водоочистки.
4. Основные типы песколовок.
5. Для чего используют осветлители в процессах водоподготовки и водоочистки?
6. Принцип действия осветлителя с взвешенным слоем осадка.
7. Для каких целей применяются нефтеловушки?
8. На какие типы подразделяются нефтеловушки?
9. Запишите формулу Стокса для скорости осаждения шарообразной частицы.
10. Перечислите типы тонкослойных отстойников.
11. От чего зависит выбор типа тонкослойного отстойника?
12. Особенности конструкций тонкослойных отстойников.
13. Преимущества тонкослойных отстойников по сравнению с полыми отстойниками.
14. От чего зависит эффективность работы тонкослойных отстойников?
15. На какие типы можно разделить тонкослойные элементы по геометрии поперечного сечения?
16. Особенности конструкции тонкослойного отстойника с гофрированными плитами.
17. Достоинства трубчатых тонкослойных отстойников.
18. От чего зависит производительность отстойника?

## ГЛАВА 2

### ФИЛЬТРОВАНИЕ

#### 2.1. Описание процесса фильтрования

*Фильтрованием* называют процесс разделения суспензий и газовых взвесей с использованием пористых перегородок, которые задерживают твердую фазу и пропускают сплошную. Процесс разделения в естественных условиях при движении жидкости через пористые грунты называют фильтрацией. Суспензии разделяют фильтрованием в тех случаях, когда взвешенные частицы слишком медленно осаждаются или когда необходимо выделить твёрдую фазу, содержащую минимальное количество жидкости [5].

Движущей силой процесса фильтрования является разность давлений  $\Delta p$  по обе стороны фильтрующего материала. Если направление процесса фильтрования совпадает с действием силы тяжести, то

$$\Delta p = (p_1 + \rho gh) - p_2, \quad (2.1)$$

где  $\rho gh$  – давление столба жидкости, Па;  $p_1, p_2$  – давление, соответственно, на и под фильтровальной перегородкой, Па.

При фильтрации газов взвешенные в газовом потоке частицы осаждаются на поверхности или в объеме пористых тел за счет броуновской диффузии, эффекта касания (зацепления), инерционных, электростатических и гравитационных сил.

Броуновская диффузия или тепловое движение частиц, вызванное столкновением с газовыми молекулами, является преобладающим механизмом осаждения частиц диаметром менее 0,1 мкм.

Эффект касания (зацепления) проявляется всякий раз, когда траектории движения частиц проходят над поверхностью волокон, зерен или других элементов, образующих пористую перегородку, на расстоянии, равном или меньшем радиуса частицы. Ситовый эффект является частным случаем эффекта касания. Определяющим параметром процесса осаждения частиц за счет эффекта касания является отношение размеров частиц и элементов, образующих пористую перегородку.

Инерционное осаждение имеет место, если масса частицы и скорость ее движения настолько значительны, что она не может полностью следовать по линии тока газа, огибающего препятствие.

Электрическое осаждение происходит либо при наличии зарядов любого знака на фильтрующих материалах или частицах, либо разноименных зарядов одновременно на тех и других.

Разделение суспензии, состоящей из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц, производят при помощи фильтра (рис. 2.1) [5], который в простейшем виде является сосудом, разделенным на две части фильтровальной перегородкой. Суспензию помещают в одну часть сосуда так, чтобы она соприкасалась с фильтровальной перегородкой. В разделенных частях сосуда создают разность давлений, под действием которой жидкость проходит через поры фильтровальной перегородки, причем твердые частицы задерживаются на ее поверхности. Таким образом, суспензия с помощью фильтра разделяется на чистый фильтрат и влажный осадок. Этот процесс разделения суспензии называют фильтрованием с образованием осадка.

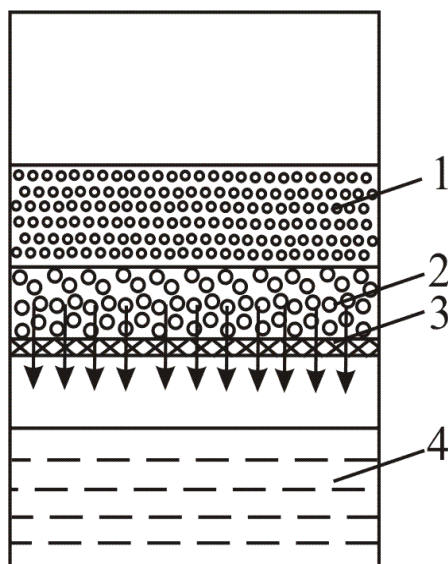


Рис. 2.1. Схема процесса фильтрования:

1 – суспензия; 2 – осадок; 3 – фильтровальная перегородка; 4 – фильтрат

Иногда твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и задерживаются там, не образуя осадка. Такой процесс называют фильтрованием с закупориванием пор.

Если пространство над суспензией сообщают с источником сжатого газа (обычно воздуха) или пространство под фильтровальной перегородкой присоединяют к источнику вакуума, то происходит *процесс фильтрования при постоянной разности давлений*. При этом скорость процесса уменьшается в связи с увеличением сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если суспензию подают на фильтр поршневым насосом, производительность которого при данном числе оборотов электродвигателя постоянна, то осуществляется *процесс фильтрации при постоянной скорости*; при этом разность давлений увеличивается вследствие увеличения сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если суспензию транспортируют на фильтр центробежным насосом, производительность которого при данном числе оборотов электродвигателя уменьшается при возрастании сопротивления осадка, что обуславливает повышение разности давлений, то производится *процесс фильтрации при переменных разности давлений и скорости*.

При фильтрации жидкость должна проходить через пористую перегородку, которая оказывает движению жидкости гидравлическое сопротивление. Чтобы жидкость могла преодолевать это сопротивление и проходить через поры фильтровальной перегородки, с обеих сторон перегородки создают разность давлений. Скорость процесса фильтрации пропорциональна разности давлений, которую создают обычно при помощи поршневых и центробежных насосов. Для этой цели можно использовать также гидростатическое давление обрабатываемой суспензии.

В начальный момент фильтрации гидравлическое сопротивление зависит от величины пор фильтрующей перегородки. По мере увеличения слоя осадка растет и его гидравлическое сопротивление. Вначале осадок играет положительную роль как дополнительный слой фильтрующей среды. Чтобы уменьшить гидравлическое сопротивление слоя осадка, его периодически или непрерывно удаляют. От гидравлического сопротивления слоя осадка и пористой перегородки зависит скорость фильтрации, которая при прочих равных условиях обратно пропорциональна гидравлическому сопротивлению.

## **2.2. Предварительное фильтрация воды [5]**

При движении воды через сетки, ткани, пористые материалы достигается извлечение из нее взвешанных веществ. Процесс осуществляется либо на поверхности, либо в глубине фильтрующего материала. Поверхностное фильтрация происходит при движении воды через объемные элементы из пористых материалов значительной толщины (патронные фильтры и фильтры из пористой керамики); сетчатые или тканевые перегородки (фильтрация под давлением или под вакуумом,

микрофильтрацию); (жесткие проницаемые каркасы с предварительно нанесенным фильтрующим слоем (намывные фильтры трубчатой, рамной или барабанной конструкции).

В зависимости от свойств применяемых фильтрующих основ и извлекаемых из воды примесей процесс фильтрации состоит из следующих трех явлений: отложения, фиксации и отрыва. Механизм отложения бывает двух видов: механическое задержание извлекаемых примесей и отложение взвешенных частиц в порах. При механическом процеживании из воды извлекаются все частицы превышающие размеры пор фильтрующей основы или пор, формируемых задержанными частицами, которые сами образуют фильтрующий слой. При этом чем меньше размеры пор фильтрующей основы, тем более высоким будет достигаемый эффект.

Процесс поверхностного фильтрации подчиняется закону Дарси, согласно которому потери напора  $P$  пропорциональны скорости фильтрации  $v$  с коэффициентом пропорциональности  $k$ , зависящим от динамической вязкости  $\eta$  и сопротивления среды  $R$ :

$$v = \frac{P}{\eta} \cdot R = k \cdot P. \quad (2.2)$$

В соответствии с законом Дарси сопротивление среды представляет собой сумму двух величин:  $R_{oc}$  – сопротивления осадка и начального сопротивления фильтрующей основы  $R_{\phi}$ :

$$R = R_{oc} + R_{\phi}. \quad (2.3)$$

Сопротивление осадка можно выразить как:

$$R_{oc} = \frac{rM}{A} = \frac{rMV}{A}, \quad (2.4)$$

где  $r$  – удельное сопротивление осадка фильтрованию при давлении  $P$ ;

$M$  – общая масса отложившегося осадка;

$W$  – масса осадка на единицу объема фильтрата;

$V$  – объем фильтрата за время  $T$ ;

$A$  – площадь поверхности фильтра.

Подставляя (2.2) и (2.3) в (2.1) получим:

$$v = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dT} = \frac{P}{\eta \left( \frac{rWV}{A} + R_{\phi} \right)}. \quad (2.5)$$

Интегрирование выражения (2.4) приводит к уравнению вида:

$$T = av^2 + b. \quad (2.6)$$

Графически это уравнение выражается прямой линией, где  $a = (r \cdot \eta \cdot W) / (2P \cdot A)$  – тангенс угла наклона к оси абсцисс;  $b = (\eta \cdot R_{\phi}) / (P \cdot A)$  – отрезок, отсекаемый прямой на оси ординат.

Следует отметить, что подобное интегрирование корректно только для несжимаемых осадков, т.е. когда  $r$  остается постоянным. В действительности с ростом давления коэффициент фильтруемости или удельное сопротивление  $r$  увеличивается согласно выражению:

$$r = r_0 + r' P^s, \quad (2.7)$$

где  $r_0$  и  $r'$  – пределы удельного сопротивления при нулевом и атмосферном давлении;  $s$  – коэффициент сжимаемости осадка.

Фильтрация через пористую основу может сопровождаться отложениями задержанных примесей на ее поверхности или внутри ее. Тип фильтрации определяется критерием:

$$\varepsilon = \frac{18P}{d^2(S-e)R_{\phi}}, \quad (2.8)$$

где  $P$  – потери напора в фильтрующей основе сопротивлением  $R_{\phi}$ ;

$d$  – средний диаметр задержанных частиц.

Если  $\varepsilon < 100$  – фильтрация будет поверхностным (пленочным), если  $\varepsilon > 1000$  – фильтрация объемное, а при  $\varepsilon = 100-1000$  – фильтрация смешанное: и поверхностное, и в объеме. Отложение взвешенных веществ в порах фильтрующей основы (объемное фильтрация) происходит, если их размер меньше размера пор и траектория движения частиц приводит к их контакту с поверхностью поровых каналов.

Этому способствуют: диффузия за счет броуновского движения; прямое столкновение; инерция частиц; прилипание за счет вандерваальсовых сил; осаждение под действием гравитационных сил; вращательное движение под действием гидродинамических сил. Фиксирование частиц примесей воды на поверхности и в порах фильтрующего материала обусловлено малыми скоростями движения жидкости, силами когезии и адсорбции.

При извлечении из воды примесей воды фильтрованием происходит уменьшение порового пространства фильтрующего материала вследствие осаждения частиц. Это влечет за собой увеличение скорости потока и изменение его режима от ламинарного к турбулентному. В этом случае задержанные частицы примесей будут частично отрываться и перемещаться потоком глубже в поры фильтрующего материала, и даже выноситься с фильтратом.

### **2.3. Классификация методов предварительной фильтрации [10]**

Выбор поверхностного или объемного фильтра обусловлен требуемым качеством фильтрата, свойствами воды и ее загрязнений, а также экономическими соображениями. Тот или иной вид фильтрования сопряжен с определенными капитальными и эксплуатационными затратами, которые, в свою очередь, определяются предварительной обработкой воды, способами промывки аппаратов, степенью автоматизации процесса и способом контроля за ним. Поверхностное фильтрование может осуществляться на тонких сетчатых перегородках, на объемных пористых элементах из твердых материалов или на жестких каркасах с предварительно нанесенным фильтрующим слоем. Фильтрование через сетчатые перегородки осуществляют на открытых или напорных аппаратах (фильтрах).

При этом различают три вида фильтрования: макрофильтрование, при котором извлекают из воды частицы крупностью более 150 мкм, микрофильтрование – извлекают частицы размером 1–150 мкм и ультрафильтрование – извлекают частицы размером 0,004–0,4 мкм. Путем макрофильтрования (макропроцеживание) через металлические перфорированные пластины или металлическую проволочную сетку размером отверстий более 0,3 мм (барабанные сетки) извлекают грубодисперсные примеси, плавающие примеси, насекомых, травы, водоросли, ветки и т. п., имеющие размеры от 0,2 до нескольких миллиметров.

Макрофильтрацию осуществляют на вращающихся макроситах и ситах с укрепленным скребком, работающих с низкими потерями напора, и на неподвижных или вращающихся самоочищающихся ситах и механических фильтрах, работающих под давлением. Вращающиеся макросита, применяемые в процессе подготовки питьевой воды и воды для орошения, представляют собой или горизонтально располагаемые барабаны, или вращающиеся сита из непрерывной сетки. Их подача варьируется от нескольких литров до кубических метров в секунду. Барабанные сетки (БС), размещаемые на водозаборе или площадке очистных сооружений, для подачи в воду реагентов используют для грубого процеживания воды (рис. 2.2).

Размер ячеек сетки из нержавеющей стали или полимеров  $,5 \times 0,5$  мм. Рабочая сетка размещается между поддерживающими сетками с размером отверстий  $10 \times 10$  мм. Интенсивность фильтрования на БС принимают  $25\text{--}62$  л/с на  $1 \text{ м}^2$  смоченной площади макросетки, так как барабан только на  $2/3$  диаметра погружен в воду. Расход воды на промывку барабанных сеток, подаваемой под давлением  $0,2$  МПа, составляет до  $0,5$  % суточного расхода.

Потери напора на макросетке составляют до  $0,1$  м. Схема работы аппарата следующая. Из бокового канала исходная вода через перфорированную часть соосно расположенного полого вала вводится внутрь вращающегося барабана, фильтруется через сетку и проникает в камеру, а далее через окна отводится в канал фильтрата. При засорении сетки и достижении максимального перепада уровней воды автоматически включается промывное устройство, которое промывает полосу сетки на верхней образующей барабана.

Промывная вода собирается воронками и по глухой части полого вала отводится за пределы аппарата. Вращающееся сито представляет собой ряд чередующихся фильтровальных полотен, выполненных из плетенных металлических, бронзовых или стальных прутьев диаметром  $0,25\text{--}1$  мм, смонтированных на жестком каркасе с размером ячеек  $3 \times 3$  мм. Сквозность сита составляет  $50\text{--}60$  %.

Скорость фильтрования по отношению к площади сита, погруженного в воду, составляет  $0,35\text{--}0,4$  м/с. Предпочтительно фильтровать обрабатываемую воду изнутри наружу, что облегчает промывку сетки и удаление задержанных примесей. Потери напора  $0,2\text{--}0,5$  м вод. ст. Для извлечения из воды крупных плавающих частиц рекомендуются сита в виде неподвижной стальной пластины с отверстиями  $2\text{--}5$  мм. Извлеченные примеси удаляются скребком или щеткой, укрепленной на конце цепи



(для прямого наклонного сита), или вращающимся устройством (для круглых сит) и сбрасываются в сборник.

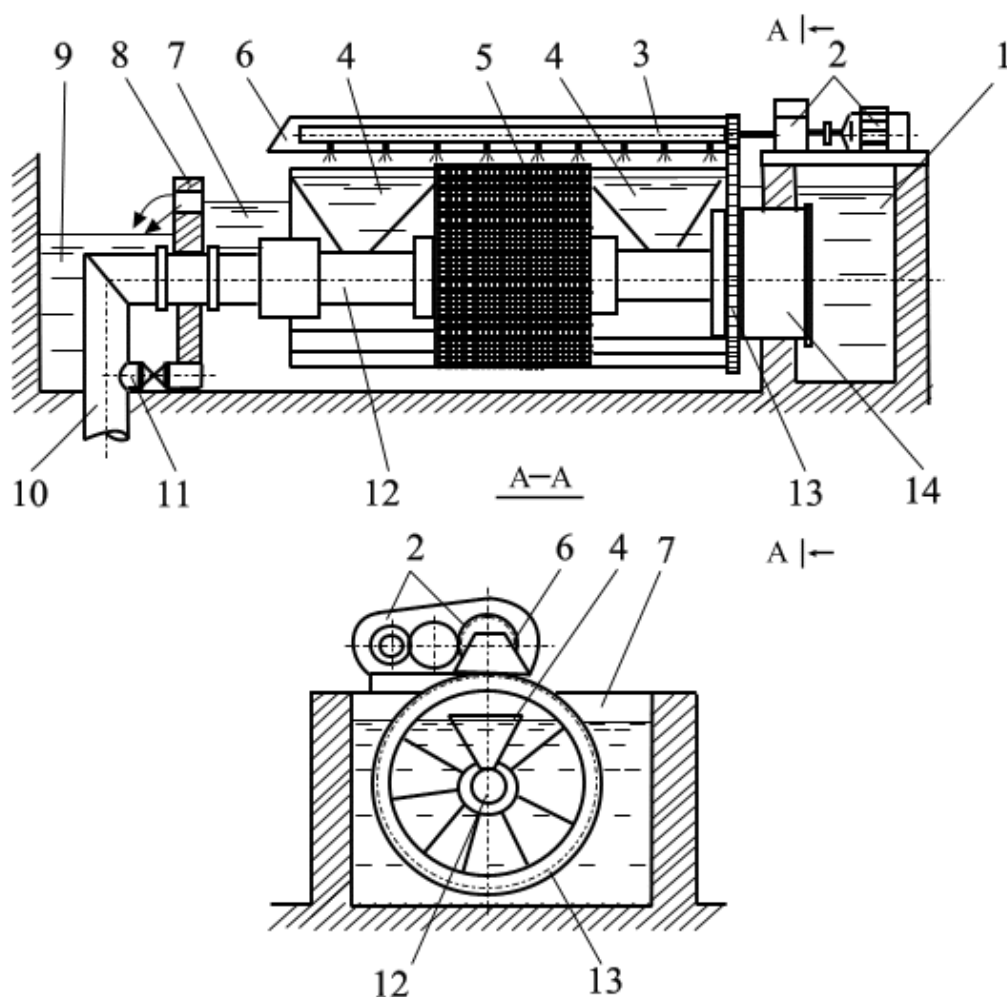


Рис. 2.2. Установка макрофильтрации на вращающихся макроситах:

- 1 и 9 – канал фильтрованной и исходной воды; 2 – электропривод для вращения барабана; 3 – промывочное устройство; 4 – воронки для сбора промывочной воды; 5 – фильтрующие элементы барабана; 6 – ограждение из оргстекла; 7 – камера БС; 8 – окна отвода фильтрата; 10 – отвод промывной воды; 11 – опорожнение; 12 – осевой трубопровод барабана с воронками; 13 – передаточный механизм; 14 – ввод исходной воды во внутрь барабана

Плоские сита целесообразно располагать в подводящих каналах шириной до 2,5 м, потери напора до 0,5 м вод. ст. Неподвижные или вращающиеся самоочищающиеся сита с размером отверстий 0,25–2 мм используют для извлечения из воды относительно крупных взвесей. Обычно неподвижные сита состоят из решетки, изготовленной из тонких прутьев, расположенных под переменным углом и смонтированных в жесткой раме. Прутья могут быть круглого, прямоугольного или треугольного сечения.

Обрабатываемая вода подается в верхнюю часть сита, а осадок непрерывно удаляется с поверхности сита специальным устройством. Вращающиеся сита состоят из цилиндрической решетки с горизонтальной осью вращения. Решетка образуется стальными прутьями трапециевидного профиля. Сито медленно вращается с линейной скоростью 0,1–0,3 м/с. Задерживаемые примеси остаются на решетке и снимаются с нее неподвижным скребком. Вращающиеся и неподвижные сита рассчитаны на подачу воды до 1 тыс. м<sup>3</sup>/ч, допустимые потери напора 2 м вод. ст. За рубежом для глубокого осветления воды широко используют механические напорные фильтры; циклонные, вращающиеся со съемными фильтровальными элементами из фарфора или стали (размер отверстий 0,1–1,6 мм), и автоматические фильтры с множеством фильтровальных трубок с отверстиями 125 мкм и более и вращающимся промывным устройством.

Микрофильтрация. Основная цель микрофильтрации – удаление планктона, содержащегося в поверхностных водах. При этом, конечно, удаляются взвешенные частицы большого размера и частицы растительного, животного происхождения, содержащиеся в воде. В зависимости от изменения расходов воды и способности частиц, содержащихся в ней, забивать фильтровальные сетки, используют различные устройства для регулирования скорости вращения барабана и один или несколько рядов промывных форсунок.

Оптимальные результаты эффективности микрофильтрации достигаются путем поддержания более или менее постоянных потерь напора, обусловленных частичным забиванием сеток задержанными частицами. Эффективность работы установки ограничена несколькими факторами: промытая фильтровальная сетка не обеспечивает надлежащего задержания в начале фильтроцикла и степень очистки при этом определяется только размерами ячеек; планктон никогда не удаляется полностью. Он может опять размножиться, особенно если повысится температура воды; яйца некоторых низших ракообразных могут легко проходить через фильтровальную сетку и развиваться, в результате чего в последующих резервуарах могут быть обнаружены видимые невооруженным глазом организмы; из-за опасности коррозии фильтровальной сетки или ее подложки нельзя применять предварительное хлорирование воды перед микрофильтрами; поверхность микрофильтров должна быть достаточно велика, чтобы обеспечить удаление большого количества планктона, развивающегося в определенные периоды года.

Если она мала, то в периоды интенсивного развития планктона и во время паводков производительность водоочистного комплекса может значительно снизиться.

Металлические или пластмассовые фильтровальные сетки в большинстве случаев имеют размеры ячеек от 20 до 40 мкм и в исключительных случаях 10 мкм. Чем меньше размер ячеек, тем больше должна быть площадь поверхности микрофильтра. Так, при размере ячеек 35 мкм скорость фильтрования должна быть не более 35 м/ч в расчете на общую площадь поверхности микрофильтра (50 м/ч в пересчете на погруженную поверхность микрофильтра), а в расчете на пиковую концентрацию взвешенных веществ – 10 м/ч.

Эффективность снижения содержания взвешенных веществ в результате микрофильтрации составляет 50–80 %, в среднем около 65 %. Для сравнения отметим, что хорошо работающий отстойник обеспечивает снижение содержания взвешенных веществ на 40–60 % без предварительного коагулирования и на 95–99 % с предварительным коагулированием.

Микрофильтры (МФ) конструктивно ничем не отличаются от барабанных сит (рис. 2.2), за исключением размеров сетки, натянутой по образующей барабана. Скорость вращения барабана МФ принимается 0,1–0,5 м/с, барабаны МФ погружают в воду на 2/3 диаметра в камеру, которая предназначена для сбора фильтрата.

Интенсивность фильтрования назначается в пределах 0–25 л/(с·м<sup>2</sup>) полезной площади микросетки, погруженной в воду. Исследования В.Ф. Соколова, Я.Я. Кару показали, что микрофильтры задерживают до 75 % диатомовых и до 95 % сине-зеленых водорослей и до 100 % задерживается зоопланктон. Микрофильтр целесообразно использовать при содержании фитопланктона более 1000 клеток в 1 см<sup>3</sup> исходной воды.

Потери напора на микросетке составляют до 0,2 м вод. ст., а общие потери напора на установке достигают 0,5 м вод. ст. Расход воды на промывку микрофильтров составляет до 1,5 % количества профильтрованной воды. Вода для промывки сетки подается под напором 0,15–0,2 МПа.

В последние годы в отечественной практике по предложению И.С. Бабаева для осветления мутных вод применяют акустические фильтры.

Акустический фильтр (АФ) (см. рис. 2.3), рекомендуемый для водоочистных установок, производительностью до 5000 м<sup>3</sup>/сут состоит из металлического корпуса с коническим днищем, внутри которого

по центру расположен фильтрующий элемент в виде металлического перфорированного стакана ( $h = 0,3-0,6$  м,  $d = 0,25-0,5$  м) скважностью 65 % с круглыми отверстиями 4–5 мм, обернутый микросеткой с размером ячеек 100–125 мкм.

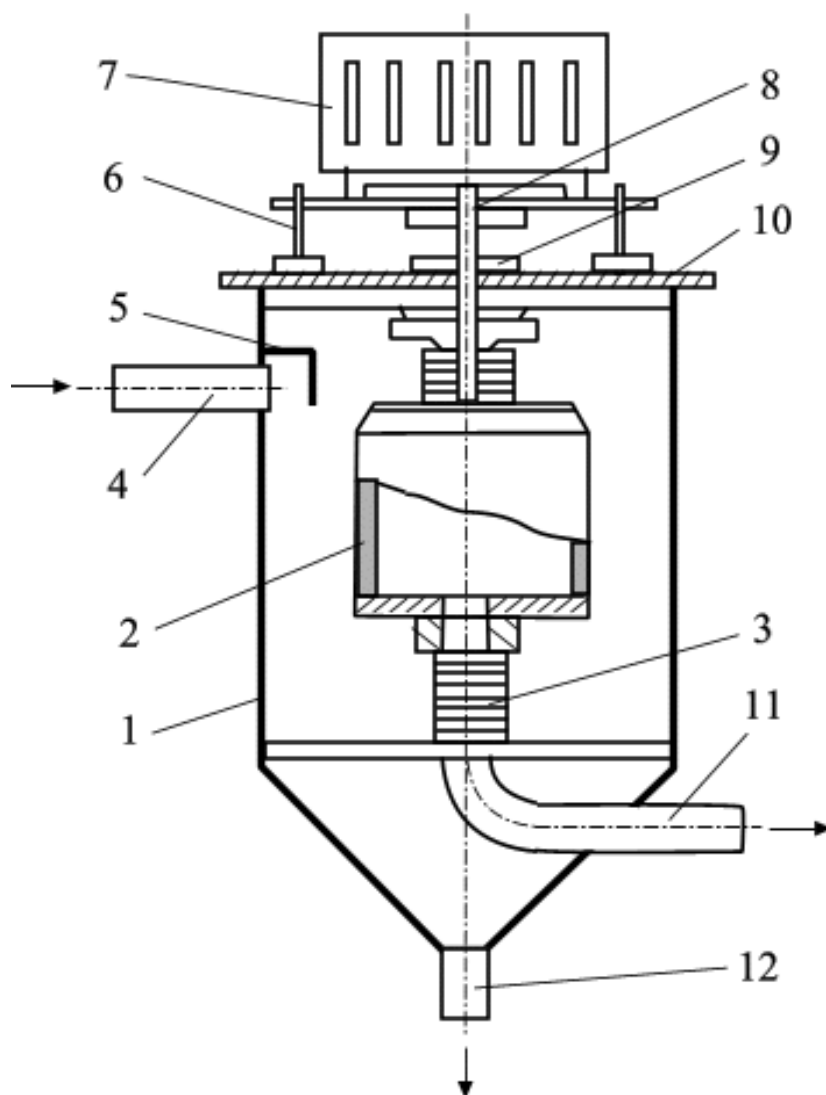


Рис. 2.3. Схема устройства акустического фильтра (АФ):

- 1 – корпус АФ; 2 – сетчатый фильтрующий элемент; 3 – сильфонные вставки;  
 4 и 11 – подача исходной и отвод обработанной воды; 5 – гаситель; 6 – амортизатор;  
 7 – электромагнитный вибратор; 8 – шток; 9 – регулировочная шайба; 10 – плита;  
 12 – сброс осадка

Нижняя часть днища АФ снабжена съемной оттарированной насадкой, рассчитываемой на 5–8 % от производительности аппарата, предназначенной для удаления осадка.

Технические характеристики приведены ниже.

Общая высота фильтра, м	1,2–1,4
Диаметр корпуса, м	0,4–0,6
Площадь фильтрации, м	до 1,0
Фильтрующие сетки по ГОСТ 6613-83, мкм	100, 125
Электромагнитный вибратор (С – 918, 921)	
Напряжение, В	220
Сила тока, А	до 1,0
Частота колебаний, Гц	50
Амплитуда колебаний, мм	до 2,0
Производительность фильтра, м <sup>3</sup> /ч	до 100
Напор перед фильтром, МПа	до 0,1
Допустимые потери напора, м вод. ст.	0,5

При работе АФ вибратор создает возвратно-поступательное движение фильтрующего элемента, изменяя габариты проходных отверстий и обеспечивая задержание более мелких примесей воды, чем размеры ячеек микросетки, которые не осаждаются на ней, не забивают ее, а оседают под действием силы тяжести. Из конусной части фильтра осадок под избыточным давлением отводится в сток.

Исходная вода, пройдя через фильтрующий элемент, передается на последующие водоочистные сооружения.

Микрофильтрация под давлением обычно осуществляется на фильтрах трех видов: дисковых, каркасно-навитых и патронных.

*Дисковые фильтры*, в которых фильтрование происходит в пространстве между дисками, собранными в пакеты, особенно чувствительны к наличию в воде водорослей и волокнистых материалов, способных необратимо забивать зазоры между дисками. Для удаления из воды частиц размером менее 10 мкм применяют фильтры производительностью 10–100 м<sup>3</sup>/ч. При удалении частиц крупностью 150 мкм производительность одного фильтра может достигать 250 м<sup>3</sup>/ч.

*Каркасно-навивные фильтры* с использованием лотковых, трубчатых, корзиночных или других типов несущих элементов покрывают:

– металлической сеткой, плоской или профилированной, для увеличения площади поверхности фильтрования. Фильтры этого типа особенно подвержены забиванию волокнистыми материалами и расклиниванию твердыми частицами (например, мелкими частицами песка). При размерах ячеек 2–40 мкм производительность фильтров составляет 0,1–150 м<sup>3</sup>/ч;

– металлической или полимерной проволокой, навитой на рамы. Они также подвержены расклиниванию песком и другими твердыми частицами. Крупность задерживаемых частиц достигает 3 мкм. При размере прозоров 5–125 мкм производительность фильтров этого типа может быть 10–1000 м<sup>3</sup>/ч;

– проволочными профилями особого сечения, навитыми на специальные стояки. Эта конструкция позволяет устранить недостатки, присущие рассмотренным выше фильтрам. При размере прозоров 80–125 мкм производительность такого фильтра может составлять от нескольких м<sup>3</sup>/ч до 5000 м<sup>3</sup>/ч и более.

*Фильтры с патронными элементами или тонкими фильтрующими пластинами*, изготовленные из гофрированного или плоского картона, целлюлозы или синтетических волокон (они могут выбрасываться после использования), часто используют как фильтры тонкой очистки, когда воду необходимо тщательно очистить от взвешенных частиц, которые проскочили на предыдущих стадиях обработки (например, при приготовлении пива, газированной воды и т. д.). На фильтрах этого типа могут быть удалены очень мелкие частицы порядка нескольких микрон и даже некоторые бактерии. Однако на такие фильтры нельзя подавать воду с относительно высоким содержанием взвешенных веществ, поскольку фильтрующие элементы немедленно забьются.

## 2.4. Фильтрация через зернистые фильтры

### 2.4.1. Основы расчета

Обычно ввиду небольшого размера пор в слое осадка и фильтровальной перегородке, а также малой скорости движения жидкой фазы в порах можно считать, что фильтрование протекает в ламинарной области. При таком условии скорость фильтрования в каждый данный момент времени прямо пропорциональна разности давлений и обратно пропорциональна вязкости жидкой фазы и общему гидравлическому сопротивлению слоя осадка и фильтровальной перегородки. Переменную скорость фильтрования выражают в дифференциальной форме [11]:

$$W = \frac{dV}{Sd\tau}. \quad (2.9)$$

В соответствии с вышеизложенным, основное дифференциальное уравнение фильтрования имеет вид:

$$\frac{dV}{Sd\tau} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{oc} + R_{фп})}, \quad (2.10)$$

где  $V$  – объём фильтрата;

$S$  – поверхность фильтрования;

$\tau$  – продолжительность фильтрования;

$\Delta P$  – разность давлений;

$\mu$  – вязкость суспензии;

$R_{oc}$  и  $R_{фп}$  – сопротивление слоя осадка и фильтровальной перегородки соответственно.

Сопротивление слоя осадка можно выразить равенством:

$$R_{oc} = r_o h_{oc} = r_o x_o \frac{V}{S}, \quad (2.11)$$

где  $r_o$  – удельное объёмное сопротивление слоя осадка;

$h_{oc}$  – толщина слоя осадка.

Приняв  $V = 0$ , что соответствует началу фильтрования, когда на фильтровальной перегородке ещё не образовался слой осадка, из уравнения (2.10) получают сопротивление фильтровальной перегородки:

$$R_{фп} = \frac{\Delta p}{\mu W}. \quad (2.12)$$

Таким образом, известны следующие уравнения фильтрования: при постоянной разности давлений ( $\Delta p = \text{const}$ ):

$$\int_0^V \mu \left( r_o x_o \frac{V}{S} + R_{фп} \right) dV = \int_0^\tau \Delta p S d\tau, \quad (2.13)$$

$$\mu r_o x_o \frac{V^2}{2S} + \mu R_{фп} V = \Delta p S \tau \quad (2.14)$$

или

$$V^2 + 2 \frac{RS}{r_o x_o} V + 2 \frac{\Delta p S^2}{\mu r_o x_o}; \quad (2.15)$$

при постоянной скорости ( $V = \text{const}$ ):

$$\Delta p = \mu r_o x_o \frac{V^2}{S^2 \tau} + \mu R_{\text{фп}} \frac{V}{S \tau} = \mu r_o x_o W^2 \tau + \mu R_{\text{фп}} W; \quad (2.16)$$

при постоянной разности давлений и скорости ( $\Delta p = \text{const}; V = \text{const}$ ):

$$V = \frac{\Delta p S}{\mu(r_o h_{\text{ос}} + R_{\text{фп}})} \tau. \quad (2.17)$$

#### 2.4.2. Характеристики фильтрующих материалов [11]

Для очистки воды от механических примесей в промышленных условиях используются главным образом зернистые «сыпучие» материалы. Основным требованием, которое предъявляется к таким материалам, является их устойчивость в обрабатываемой воде. Материал не должен загрязнять воду, поскольку любое даже незначительное загрязнение воды обязательно приведет к увеличению стоимости ее очистки. Фильтрующий материал также должен быть дешев и легкодоступен.

Понятие загрязнения является неотъемлемой характеристикой очищенной воды и для каждой технологической схемы очистки индивидуально. Так, для воды, которая в процессе очистки не освобождается от соединений кремния, содержание последних в ней не является загрязнением. Таковую воду очищать от механических примесей удобнее всего с помощью кварцевого песка или керамической крошки. Эти материалы дешевы, легкодоступны, однако при контакте с водой способны обогащать ее оксидами кремния, и поэтому для очистки воды, из которой далее практически полностью удаляются неорганические примеси, они не приемлемы. В этом случае применяются более стойкие, но и более дорогие материалы: дробленый антрацит, сульфуголь, технический фильтрперлит, зерненный сополимер дивинилбензола и стирола.

Применение зернистых материалов для удаления механических примесей при организации многотоннажных производств очищенной воды вызвано особенностью строения их слоя, в котором частицы материала чередуются с пустотами, называемыми обычно порами слоя.



Соединяясь между собой, поры слоя образуют поровые каналы, по которым протекает очищаемая вода. От формы, размеров и количества таких каналов в единице объема слоя будет зависеть не только гидравлический режим течения воды, но и качество ее очистки.

Согласно определению пористость слоя (одна из основных величин) не зависит от диаметра частиц, образующих его. Однако это справедливо только для слоев, состоящих из монодисперсных частиц. Пористость в таких слоях определяется характером укладки частиц в слое.

В полидисперсных слоях пористость зависит от коэффициента неоднородности и с увеличением его уменьшается. Это происходит в результате расположения мелких зерен в пространстве между крупными. При работе такого слоя возникающие вследствие флуктуации силовых полей случайные перемещения зерен внутри его непременно ведут к накоплению мелких зерен в пространстве между крупными, т. е. к самоуплотнению слоя. Поэтому полидисперсные слои слеживаются быстрее, чем монодисперсные, и чем больше коэффициент неоднородности, тем больше вероятность слеживания. Это обстоятельство является одной из причин ограничения коэффициента неоднородности у фильтрующих материалов.

Дисперсный состав фильтрующих материалов, используемых в практике очистки воды на ТЭС и АЭС, ограничивается, с одной стороны, гидравлическим сопротивлением фильтрующего слоя (нельзя применять слишком мелкие материалы), с другой – качеством очищенной воды (на крупнозернистых материалах эффективность очистки невысока). Нижний предел дисперсного состава ограничивается также конструктивными особенностями механических фильтров – размер зерна не должен быть меньше размера отверстий дренажных устройств, через которые отводится вода из фильтра. Это ограничение влечет за собой и требование повышенной механической прочности фильтрующих материалов, ограничивающей появление мелкой фракции, а следовательно, увеличивающей и срок его эксплуатации. Дисперсность фильтрующих материалов, применяемых в настоящее время, определилась в процессе их длительной эксплуатации.

Из всех упомянутых фильтрующих материалов наибольшее распространение в производстве добавочной воды на ТЭС и АЭС получил антрацит. Он достаточно дешев, а главное, химически стоек. При контакте частиц антрацита с фильтруемой водой прирост в ней кремниевой кислоты

не превышает примерно  $2 \text{ мг } SiO_3^{-2} / H_2O$ , окисляемости – не более  $8 \text{ мг } O_2 / \text{кг } HO_2$ , сухого остатка – не более  $10 \text{ мг} / \text{кг}$ . Механическая прочность антрацита такова, что годовые потери его не превышают  $2,5 \%$ .

В технологических схемах очистки конденсата используют чаще всего сульфоуголь или катионит КУ-2. В последнее время широкое распространение получил предложенный кафедрой ТВТ МЭИ новый фильтрующий материал – сополимер дивинилбензола и стирола, являющийся отходом производства ионитов. Этот материал обладает очень высокой химической стойкостью, практически не загрязняет очищенный конденсат, способен достаточно полно удалять механические примеси и в процессе эксплуатации слеживается значительно меньше сульфоугля и катионита КУ-2.

### 2.4.3. Фильтрационные установки с зернистой загрузкой [10]

Одной из основных характеристик, используемых для классификации фильтров, является периодичность или непрерывность их действия, в связи с чем они подразделяются на фильтры периодического и непрерывного действия. Для осуществления процессов фильтрования с образованием осадка применяют как периодически, так и непрерывно действующие фильтры. Для проведения процессов фильтрования с закупориванием пор используют фильтры периодического действия. На фильтрах периодического действия осуществляют любой режим фильтрования, на фильтрах непрерывного действия практически только режим фильтрования при постоянной разности давлений.

В процессах очистки сточных вод, как правило, приходится иметь дело с большим количеством воды, поэтому применяют фильтры, для работы которых не требуется высоких давлений. Исходя из этого, используют фильтры с сетчатыми элементами (микрофильтры и барабанные сетки) и фильтры с фильтрующим зернистым слоем.

Фильтры с зернистым слоем подразделяют на медленные и скоростные, открытые и закрытые. Медленные фильтры используют для фильтрования некоагулированных сточных вод. Достоинством этих фильтров является высокая степень очистки сточных вод. Недостатки: большие размеры, высокая стоимость и сложная очистка от осадка.

Схема одного из скоростных фильтров показана на рис. 2.4.

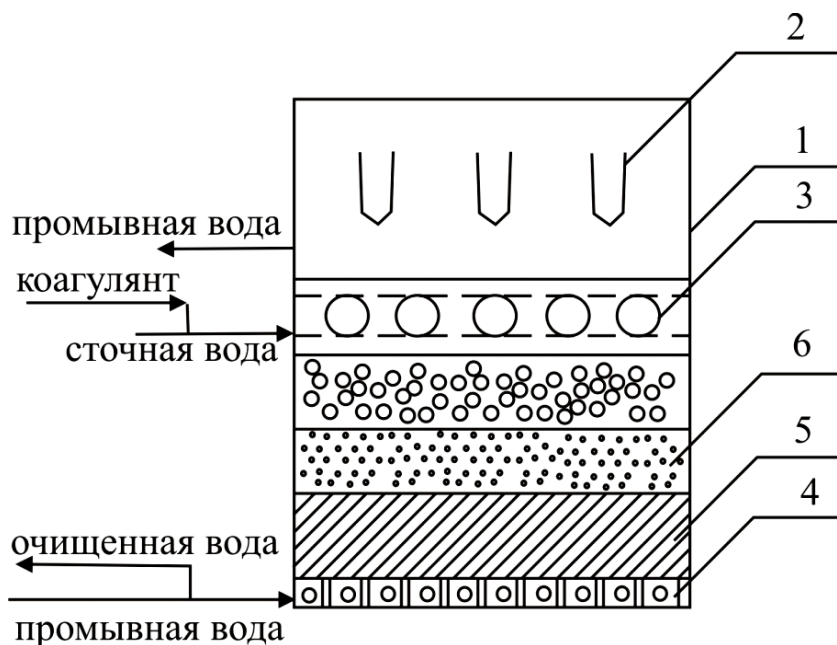


Рис. 2.4. Скоростной контактный фильтр:

1 – корпус; 2 – система удаления промывных вод; 3 – система подачи сточных вод; 4 – система подачи промывных вод; 5 – пористый дренаж; 6 – фильтрующий материал

Сточную воду в фильтр подают внутрь, где она проходит через фильтрующий материал и дренаж и удаляется из фильтра. После засорения фильтрующего материала проводят промывку подачей промывных сточных вод снизу вверх. Скоростные фильтры имеют более высокую производительность и большую продолжительность фильтрования.

Особенностью фильтра с подвижной загрузкой (рис. 2.5) является вертикальное расположение фильтрующей загрузки и горизонтальное движение фильтруемой воды. Фильтрующим материалом служит кварцевый песок (1,5–3 мм) или гранитный щебень (3–10 мм).

Сточная вода поступает в коллектор, откуда через каналы и отверстия поступает в фильтрующий слой. Очищенную воду отводят из фильтра через дренажную камеру. Загрязненный материал перекачивают гидроэлеватором по трубе в промывное устройство. Эффективность очистки составляет 50–55 %.

*Осветлительные фильтры* подразделяются по фракционному составу фильтрующих материалов на насыпные и намывные. Насыпные фильтры применяют для очистки воды от грубодисперсных и коллоидно-дисперсных частиц на установках, предназначенных для приготовления добавочной воды, а также на установках, в которых подвергают очистке конденсат турбины. Намывные фильтры применяют для очистки конденсата и питательной воды от продуктов коррозии.

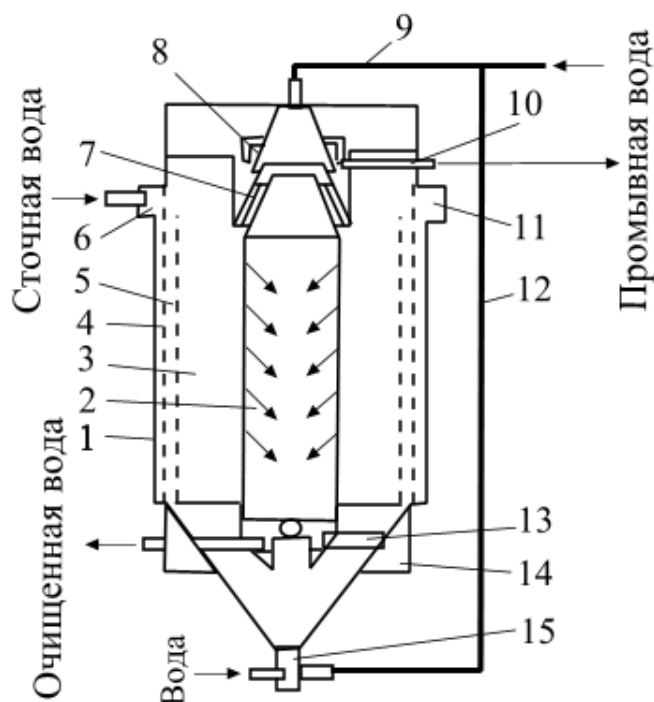


Рис. 2.5. Фильтр с подвижной загрузкой:

- 1 – корпус; 2 – дренажная камера; 3 – средняя камера; 4 – каналы; 5 – щелевые трубы;  
 6 – ввод сточной воды; 7 – классификатор; 8 – промывное устройство;  
 9 – труба для подачи промывной воды; 10 – отвод промывной воды;  
 11 – коллектор; 12, 13 – трубы; 14 – кольцевой коллектор; 15 – гидроэлеватор

Насыпные осветлительные фильтры в свою очередь подразделяются: по типу – на горизонтальные и вертикальные, по давлению воды над фильтрующим слоем – на самотечные и напорные, по количеству фильтрующих слоев – на однослойные и двухслойные, по количеству параллельно работающих камер – на одно-, двух- и трехкамерные, по способу фильтрования – на одно- и двухпоточные.

*Фильтры с полимерной загрузкой.* Одним из путей интенсификации фильтрования сточных вод является применение новых фильтрующих материалов. Перспективным является использование плавающих загрузок из различных полимерных материалов, обладающих достаточной механической прочностью, химической стойкостью, высокой площадью активной свободной поверхности и пористостью. К числу таких материалов относятся полистирол различных марок (в том числе пенополистирол), пенополиуретан, а также гранулы керамзита, котельные и металлургические шлаки.

В зависимости от содержания и характера взвешенных веществ в сточной воде, подаваемой на очистные сооружения, а также от их пропускной способности применяются следующие схемы фильтрования:

через многоярусные или многослойные фильтры с загрузкой по убывающей крупности гранул по ходу осветляемой воды снизу вверх; через фильтры большой грязеемкости при фильтровании воды сверху вниз, с горизонтальным направлением фильтрования; с непрерывной регенерацией загрузки.

Фильтры с плавающей пенополистирольной загрузкой используют для очистки сточных вод от взвешенных веществ. В качестве плавающей фильтрующей загрузки в этих фильтрах применяют вспененные гранулы пенополистирола. Этот материал износостойчив, водонепроницаем, нетоксичен, имеет достаточную механическую прочность и высокую адгезионную способность (плотность  $0,01-0,03 \text{ г/см}^3$ ).

Фильтры с плавающей загрузкой из полистирола могут быть одно- и двухслойными, а также встроенными в первичные или вторичные отстойники. Скорость фильтрации в таких фильтрах  $0,6-2 \text{ м/ч}$ . Для регенерации зернистых фильтрующих материалов проводится интенсивная водовоздушная промывка.

Внутри фильтра находятся два слоя гранул, разделенных удерживающими сетками. В нижнем слое, служащем для предварительного фильтрования, применяют гранулы диаметром  $2-5 \text{ мм}$ , верхний слой загрузки с гранулами диаметром  $0,3-2 \text{ мм}$  предназначен для более глубокого фильтрования.

Фильтры с пенополиуретановой загрузкой типа «Полимер» (рис. 2.6) предназначаются для очистки невзрывоопасных сточных вод от нефтепродуктов и масел, находящихся в виде нестойких эмульсий и имеющих  $\text{pH} = 6-9$ .

Сточные воды, содержащие отработанные смазочно-охлаждающие жидкости, а также сточные воды гальванических, травильных и окрасочных отделений могут подаваться на пенополиуретановые фильтры только после обработки их на локальных очистных сооружениях. Для обеспечения требуемой степени очистки сточных вод эти фильтры рекомендуется применять после решеток, песколовков и нефтеловушек.

В схемах обработки воды на ТЭС и АЭС наиболее широко распространены вертикальные однопоточные напорные осветлительные фильтры (рис. 2.7). Фильтр состоит из цилиндрического корпуса приваренными к нему верхним и нижним эллиптическими штампованными днищами, слоя фильтрующего материала, расположенного внутри фильтра и дренажно-распределительных устройств. Снаружи фильтра расположены трубопроводы подвода и отвода воды

и сжатого воздуха, а также арматура и приборы для управления режимом работы фильтра.

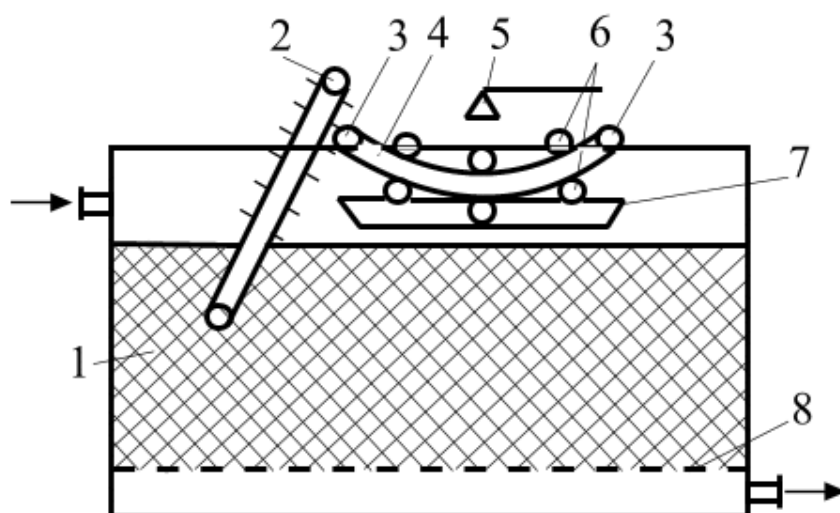


Рис. 2.6. Пенополиуретановый фильтр:

1 – слой пенополиу 2 – элеватор; 3 – направляющие ролики; 4 – лента; 5 – ороситель; 6 – отжимные ролики; 7 – емкость; 8 – решетка

Важнейшим элементом конструкции осветлительного фильтра являются дренажно-распределительные устройства. Верхнее дренажно-распределительное устройство предназначено для подвода в фильтр и равномерного распределения по площади поперечного сечения обрабатываемой воды, а также для удаления из фильтра взрыхляющей воды. Распределительное устройство состоит из вертикального коллектора, заглушенного снизу, и радиально расположенных перфорированных распределительных труб, вставленных в отверстия вертикального коллектора. Наружные концы распределительных труб заглушены и прикреплены к корпусу фильтра. Распределительные трубы установлены отверстиями вверх.

Нижнее дренажно-распределительное устройство предназначено для обеспечения равномерного сбора отработавшей воды, равномерного распределения по площади поперечного сечения взрыхляющей воды и сжатого воздуха. Распределительное устройство состоит из вертикального коллектора с заглушённым верхним концом, четырех отводов, вставленных в радиально расположенные отверстия вертикального коллектора под углом к горизонтальной плоскости. Отводы крепятся к вертикальному коллектору с помощью сварки.

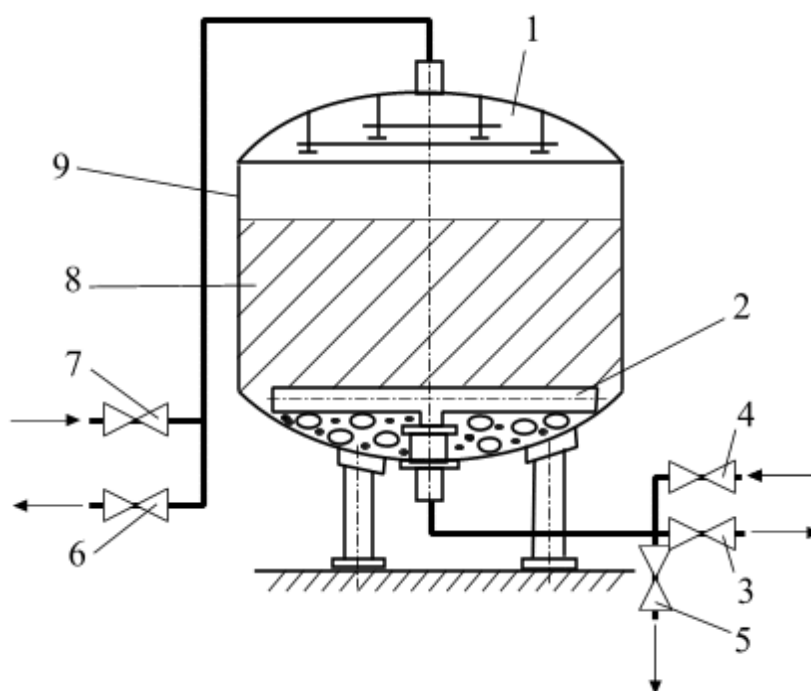


Рис. 2.7. Фильтр осветлительный вертикальный однокамерный:  
 1 – верхнее распределительное устройство; 2 – нижнее дренажно-распределительное устройство; 3 – фильтрат; 4 – сжатый воздух, промывочная вода;  
 5 – спуск первых порций фильтрата; 6 – спуск промывочной воды; 7 – исходная вода;  
 8 – фильтрующий слой, 9 – корпус фильтра

От каждого отвода также под углом к горизонтальной плоскости отходят перфорированные распределительные трубы, по нижней образующей которых расположены отверстия диаметром 8 мм. Отверстия прикрывает приваренный щелевой желобок с шириной щели 0,4 мм. Концы распределительных труб, вставляемые в отверстия отводов, обжаты на конус, а противоположные концы заглушены. Места соединения распределительных труб с отводами уплотнены болтами через специальные полосы, которые прикреплены одним концом к отводам, а другим к корпусу и фиксируются сварным швом.

Конструкция фильтра предусматривает наличие слоя воды, называемой водяной подушкой, над слоем фильтрующего материала. Водяная подушка необходима для того, чтобы обеспечить равномерное распределение воды по площади сечения фильтра и сгладить отдельные потоки воды, выходящей из верхнего дренажно-распределительного устройства. Для отвода воздуха из фильтра при заполнении последнего водой предусмотрена труба (воздушник). Для отбора проб исходной воды и фильтрата на анализ предусмотрены пробоотборные линии с кранами,

на которых одновременно располагаются манометры для контроля за перепадом давления на слое фильтрующего материала. На цилиндрической части корпуса располагаются верхний и нижний люки, предназначенные для монтажа и ремонта дренажно-распределительных устройств, а также для загрузки и выгрузки фильтрующего материала. Верхний смотровой люк служит также для наблюдения за поверхностью слоя фильтрующего материала. К нижнему днищу фильтра приварены три опоры для установки фильтра на фундамент, к верхнему днищу фильтра – две косынки для подъема фильтра при транспортировке и установке на фундамент.

Двухкамерный осветлительный фильтр (рис. 2.8) разделен по высоте плоским днищем на две камеры.

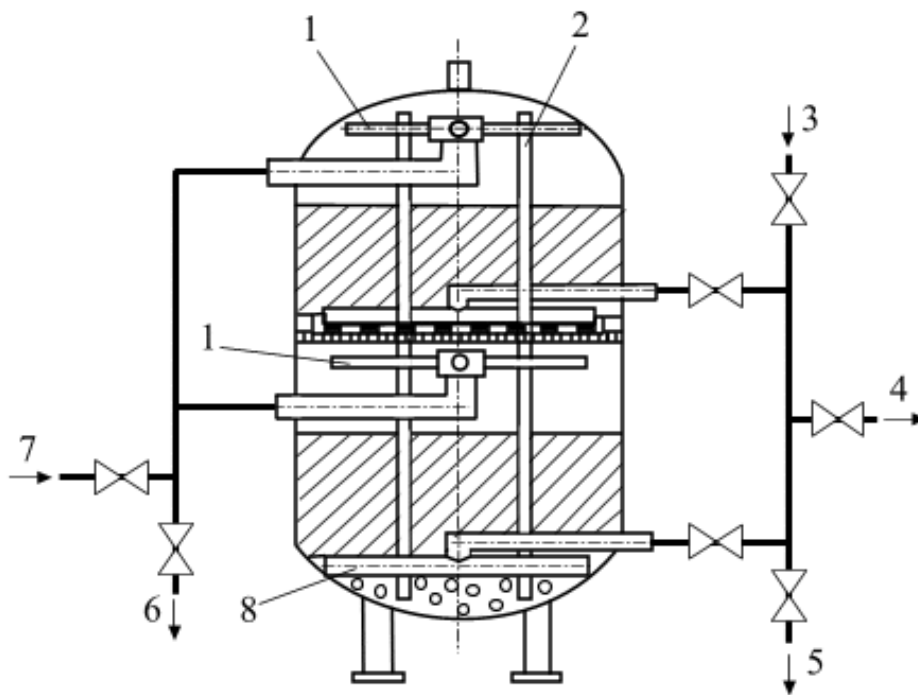


Рис. 2.8. Двухкамерный осветлительный фильтр:

- 1 – верхние распределительные устройства; 2 – анкерная труба для выравнивания давления между камерами; 3 – подвод промывочной воды; 4 – выход фильтрата;  
 5 – спуск первых порций фильтрата; 6 – выход промывочной воды;  
 7 – обрабатываемая вода; 8 – нижние дренажно-распределительные устройства

Промежуточное плоское днище снабжено ребрами жесткости, а также анкерными трубами для выравнивания давления в камерах фильтра. Двухкамерные фильтры по сравнению с однопоточными осветлительными фильтрами позволяют экономичнее использовать объем помещения водоподготовительной установки.



*Намывной механический фильтр* (рис. 2.9) состоит из следующих основных элементов: корпуса, трубной доски, фильтрующих элементов, трубопроводов, арматуры. Корпус фильтра – цилиндрический, сварной, из листовой стали с фланцевым разъемом в верхней части фильтра и приваренными верхним и нижним днищами. К нижнему днищу приварены три опоры для установки фильтра на фундамент, к верхнему – три косынки для подъема корпуса при его транспортировке и установке на фундамент.

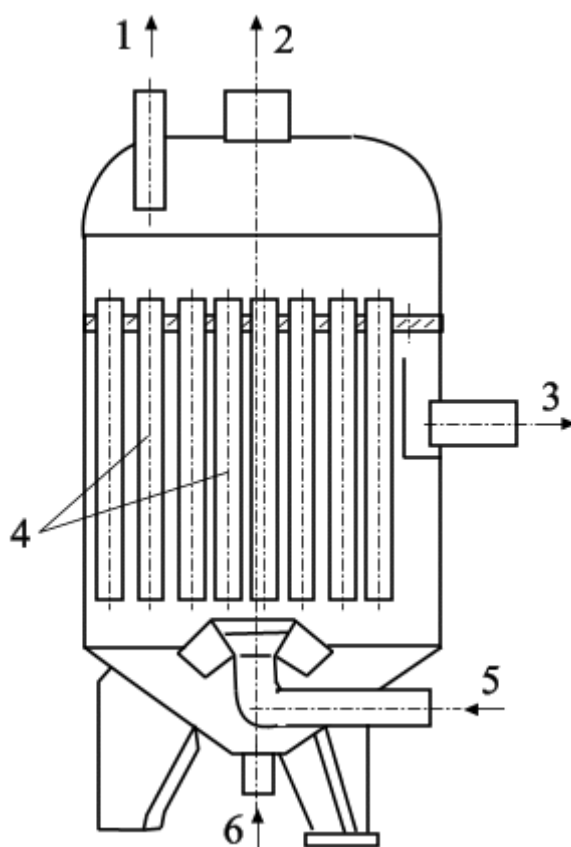


Рис. 2.9. Фильтр намывной АФНм-1,2-10:

- 1 – воздушник; 2 – выход очищенной воды; 3 – сброс сжатого воздуха при шоковой регенерации; 4 – фильтрующий элемент; 5 – вход обрабатываемой воды; 6 – удаление отработавшего фильтропорошка и вход суспензии фильтроперлита при намывке фильтрующего слоя

Во фланцевом разьеме помещается трубная доска с пакетом фильтрующих элементов. Фильтрующий элемент представляет собой дырчатую трубу, обвитую проволокой. Верхняя часть фильтрующего элемента вставляется в трубную доску снизу и закрепляется гайкой и контргайкой. Диаметр проволоки и шаг навивки ее выбраны таким

образом, чтобы обеспечить зазор между витками, равный 0,1 мм. Вверху цилиндрической части нижней камеры фильтра приварены штуцер и короб для сброса воздуха при регенерации.

## 2.5. Ионитные фильтры [11]

Ионитные фильтры, применяемые на установках по очистке воды, различают по следующим признакам:

- по обмениваемому иону фильтры подразделяют на: катионитные, анионитные, фильтры смешанного действия;
- по фракционному составу ионитов – на насыпные и намывные;
- по способу проведения регенерации – на параллельно-точные, противоточные, ступенчато-противоточные;
- по технологическому применению – на фильтры различных ступеней первая, вторая и т. д.

При параллельно-точном способе регенерации обрабатываемую воду и регенерационный раствор пропускают через фильтр, загруженный ионообменным материалом, в одном и том же направлении. При противоточном способе регенерации обрабатываемую воду и регенерационный раствор пропускают через фильтр в противоположном направлении. Ступенчато-противоточный способ регенерации применяют в схемах, предусматривающих обработку воды на фильтрах различных ступеней. Обрабатываемую воду пропускают последовательно через фильтры 1-й и 2-й ступеней, регенерационный раствор – в обратном направлении. Регенерацию ионитов фильтров смешанного действия проводят после разделения ионообменной смеси на катионит и анионит.

*Ионитный параллельно-точный фильтр 1-й ступени* (рис. 2.10) состоит из корпуса, нижнего и верхнего дренажно-распределительных устройств, трубопроводов, арматуры, устройств для отбора проб воды на химический анализ.

Корпус фильтра представляет собой сварной цилиндр, изготовленный из листовой стали, с приваренными к нему верхним и нижним эллиптическими днищами. Корпус фильтра снабжен двумя люками. Верхний люк предназначен для загрузки фильтрующего материала, осмотра и ремонта элементов верхнего дренажно-распределительного устройства, а также для контроля за состоянием поверхности фильтрующего материала. Нижний люк служит для производства монтажных работ внутри фильтра, контроля за состоянием нижнего дренажно-распределительного устройства и его ремонта.

В верхней части фильтра к корпусу приварен трубопровод для гидравлической загрузки фильтрующего материала. В нижней части фильтра на уровне нижнего дренажно-распределительного устройства имеется трубопровод для гидравлической выгрузки фильтрующего материала. К верхнему днищу фильтра приварены две косынки, необходимые для подъема фильтра при его транспортировке и установке на фундамент. Для отвода воздуха из фильтра при заполнении его водой к верхнему днищу приварена труба-воздушник.

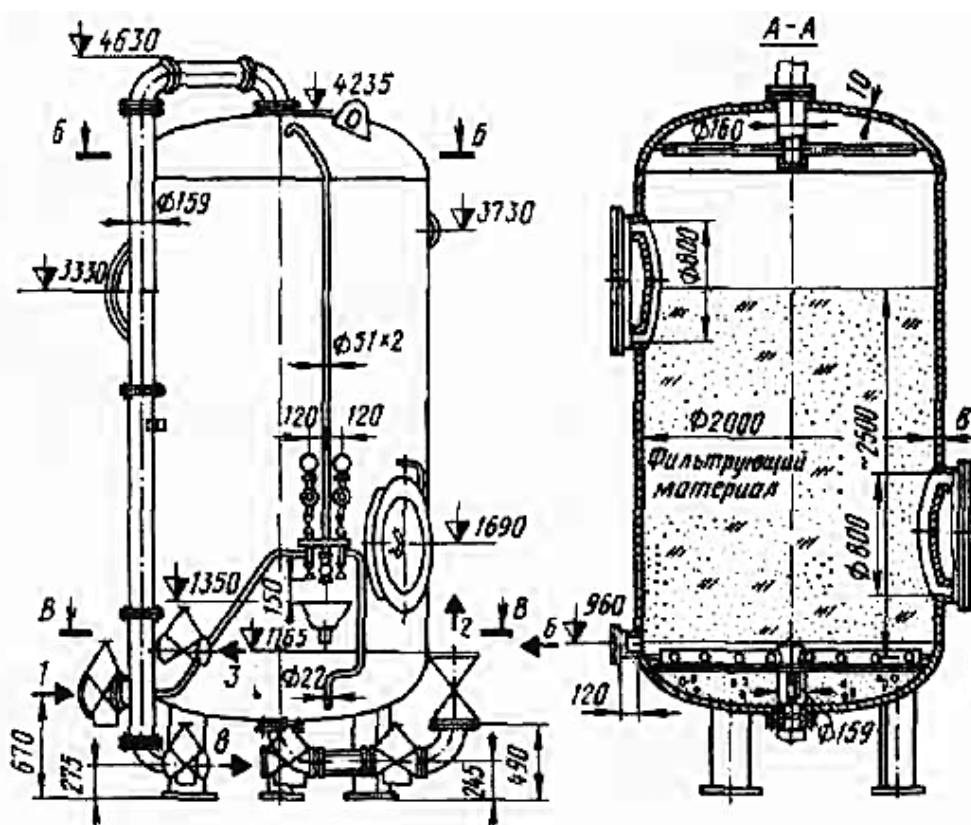


Рис 2.10. Фильтр ионитный параллельно-точный 1-й ступени ФИПа1-2,0-0,6:  
 1 – подвод исходной и отмывочной воды; 2 – отвод обработанной воды;  
 3 – подвод регенерационного раствора; 4 – подвод взрыхляющей воды;  
 5 – гидрозагрузка фильтрующего материала; 6 – гидровыгрузка фильтрующего материала; 7 – отвод регенерационного раствора, отмывочной воды и первого фильтрата; 8 – отвод взрыхляющей воды

Верхнее дренажно-распределительное устройство служит для подачи в фильтр и равномерного распределения по площади поперечного сечения фильтра обрабатываемой воды и регенерационного раствора, а также для сбора и отвода из фильтра взрыхляющей воды. Оно состоит из вертикально расположенного отрезка трубы-коллектора, изготовленного из полиэтилена и заглушённого снизу, и радиально расположенных перфорированных трубок, изготовленных из полиэтилена и вставленных в отверстия

коллектора. Наружные концы лучей заглушены и прикреплены к внутренней поверхности корпуса фильтра.

Лучи установлены таким образом, чтобы отверстия их были направлены вверх. Нижнее дренажно-распределительное устройство предназначено для сбора и отвода из фильтра обработанной воды, регенерационного раствора и отмывочной воды, а также для подачи в фильтр и равномерного распределения по площади поперечного сечения взрыхляющей воды. Нижнее устройство состоит из вертикального коллектора, изготовленного из коррозионно-стойкой стали, с заглушённым верхним концом, двух горизонтальных полимерных труб отводов, вставленных в отверстия в коллекторе. В отверстия отводов вставлены распределительные трубы, наружные концы которых заглушены. Распределительные трубы изготовлены из щелевых полиэтиленовых колец, насаженных на трубу-стяжку из полиэтилена.

Нижнее днище фильтра заливают битумом с наполнителем из антрацита. Верхний слой заливки, на который опираются элементы нижнего дренажно-распределительного устройства толщиной 50–60 мм, выполняют из мастики битуминоль. Нижнее дренажно-распределительное устройство может быть выполнено в виде трубчатой системы со щелевыми колпачками типа ВТИ-К. Применяют также щелевые колпачки конструкции ВНИИАМ, изготовленные из сополимера стирола СНП-2. Эти щелевые колпачки являются химически стойкими при контакте с водой и растворами солей, кислот и щелочей, имеющих концентрацию 5–10 %. Они являются механически стойкими при гидравлическом сопротивлении до 0,2 МПа.

Пробоотборное устройство состоит из нержавеющей трубок, присоединенных к трубопроводам подачи и отвода, клапанов и манометров, показывающих гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя.

*Ионитный параллельно-точный фильтр 2-й ступени* (рис. 2.11) состоит из корпуса, дренажно-распределительных устройств, трубопроводов, арматуры, пробоотборных устройств. Корпус фильтра представляет собой цилиндр, сваренный из листовой углеродистой стали, с приваренными эллиптическими штампованными днищами. Фильтр установлен на фундамент с помощью трех опор, приваренных к нижнему днищу, и оборудован двумя люками.

Верхний люк предназначен для загрузки фильтрующего материала, монтажа и ремонта верхнего дренажно-распределительного устройства, а также для контроля за состоянием поверхности фильтрующего материала. Нижний люк служит для обеспечения монтажа всех устройств внутри фильтра, а также для ремонта нижнего дренажно-распреде-

тельного устройства. Фильтр снабжен штуцерами для гидравлической загрузки и выгрузки фильтрующего материала. К верхнему днищу приварены косынки для подъема корпуса фильтра при его транспортировке.

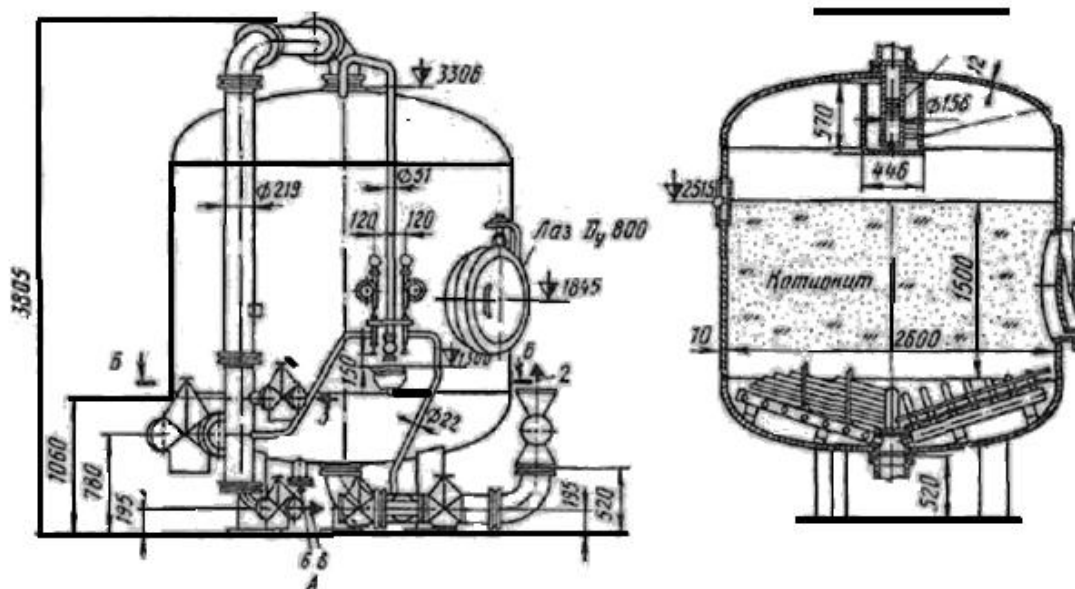


Рис. 2.11. Фильтр ионитный параллельно-точный 2-й ступени ИПаП-2,6-0,6.

- 1 – подвод исходной и отмывочной воды; 2 – отвод обработанной воды;  
 3 – подвод регенерационного раствора; 4 – подвод взрыхляющей воды;  
 5 – гидрозагрузка фильтрующего материала; 6 – гидровыгрузка фильтрующего материала;  
 7 – отвод регенерационного раствора, отмывочной воды и первого фильтрата; 8 – отвод взрыхляющей воды

Верхнее дренажно-распределительное устройство служит для подачи в фильтр воды и регенерационных растворов, а также для вывода из фильтра воды после взрыхления фильтрующего материала. Оно состоит из двух вставленных друг в друга цилиндрических патрубков, изготовленных из коррозионно-стойкой стали, в поверхности которых просверлены отверстия. Верхний конец внутреннего патрубка соединен с трубой, подающей воду в фильтр. Нижний конец наружного патрубка прикреплен к внутреннему патрубку, а верхний конец прижат к внутренней поверхности верхнего днища.

Нижнее дренажно-распределительное устройство служит для равномерного сбора очищенной воды, регенерационного раствора и распределения по площади поперечного сечения фильтра взрыхляющей воды. Оно состоит из вертикального коллектора с заглушённым верхним концом и радиально расположенными отверстиями, к которым приварены четыре коллектора-отвода. Коллекторы-отводы расположены под углом

к горизонтальной плоскости для большего приближения к внутренней поверхности нижнего днища фильтра. От каждого коллектора-отвода отходят распределительные трубы, по нижней образующей которых просверлены отверстия, прикрытые щелевым желобком. Распределительные трубы в местах соединения с коллекторами-отводами обжаты на конус. Противоположные концы распределительных труб заглушены. Все элементы нижнего дренажно-распределительного устройства изготовлены из нержавеющей стали.

Устройство для отбора проб воды состоит из трубок, изготовленных из коррозионно-стойкой стали и присоединенных к трубопроводам подачи воды в фильтр и отвода воды из фильтра. Пробоотборные трубки снабжены кранами и манометрами, регистрирующими гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя. Отбираемая для анализов вода может отводиться в сливную воронку. Для отвода воздуха из фильтра в верхнее днище вварена труба.

*Ионитный фильтр смешанного действия* с внутренней регенерацией представляет собой вертикальный однокамерный цилиндрический аппарат и состоит из следующих основных элементов: корпуса, верхнего, среднего, нижнего распределительных устройств, трубопроводов, запорной арматуры, пробоотборного устройства и фильтрующей загрузки [10].

Корпус фильтра цилиндрический, сварной из листовой стали, с приваренными эллиптическими штампованными днищами. К нижнему днищу приварены три опоры для установки фильтра на фундамент. Корпус фильтра снабжен двумя лазами. Верхний эллиптический лаз предназначен для загрузки фильтрующего материала, ревизии верхней распределительной системы и периодического осмотра состояния поверхности фильтрующего материала. Через нижний люк выполняют монтаж всех устройств внутри корпуса фильтра, периодические осмотр и ремонт среднего и нижнего распределительных устройств, нанесение антикоррозионных покрытий.

На обечайке корпуса на уровне среднего распределительного устройства размещено смотровое окно, позволяющее вести наблюдение за разделением катионита и анионита. В центрах верхнего и нижнего днищ фильтра приварены фланцы, к которым снаружи присоединяют трубопроводы, а внутри – верхнее и нижнее распределительные устройства.

К верхнему днищу корпуса фильтра приварены две косынки для подъема корпуса фильтра при его транспортировке и установке на фундамент. Для периодического отвода воздуха, скапливающегося в верхней части фильтра, имеется трубка с клапаном. На уровне нижнего распределительного устройства к корпусу фильтра приварен штуцер для гидровыгрузки фильтрующего материала.

Верхнее распределительное устройство предназначено для подачи в фильтр на обработку добавочной воды или конденсата, воды или конденсата при отмывке ионитов от продуктов регенерации, блокирующего потока воды или конденсата при пропуске через катионит регенерационного раствора кислоты, для подачи регенерационного раствора едкого натра при регенерации анионита, а также для сброса потока воды при взрыхлении и разделении ионитов.

Верхнее сборно-распределительное устройство состоит из двух вставленных друг в друг перфорированных патрубков («стакан в стакане»), нижний конец которых заглушён; верхний конец внутреннего патрубка соединен с подающей трубой, а нижний патрубок верхним концом прикреплен к верхнему сферическому днищу. Среднее распределительное устройство предназначено для отвода из фильтра отработавших регенерационных растворов и блокирующих потоков воды или конденсата при регенерации ионитов, а также потоков воды или конденсата при отмывке ионитов после их регенерации. Оно состоит из расположенного по диаметру фильтра коллектора, соединенного с отводящим трубопроводом. С обеих сторон коллектора в его отверстия вставлены перфорированные распределительные трубы с обжатыми на конус концами; другие их концы заглушены. На нижней образующей распределительных труб расположены отверстия, закрытые щелевыми желобками.

Места сочленения распределительных труб с коллекторами уплотнены нижними болтами через полосы, приваренные к стенкам корпуса. Распределительные трубы установлены строго горизонтально. При нормальной работе фильтра и во время его регенерации возникают большие усилия, действующие на среднее распределительное устройство в вертикальном направлении как сверху, так и снизу. В связи с этим предусмотрено специальное крепление коллектора и труб распределительного устройства к корпусу фильтра.

Нижнее распределительное устройство предназначено для сбора обессоленной и обескремненной воды или конденсата при работе и отмывке фильтрующего слоя, для подвода воды или конденсата и воздуха при взрыхлении ионитной шихты и разделении ионитов, для подачи регенерационного раствора кислоты при регенерации катионита.

Нижнее распределительное устройство состоит из вертикального коллектора с заглушённым верхним концом, четырех отводов-коллекторов, вставленных в радиально расположенные отверстия вертикального коллектора. Для максимального приближения к днищу

фильтра коллекторы-отводы расположены под углом к горизонтальной плоскости, они крепятся к вертикальному коллектору сваркой.

От каждого коллектора-отвода с одной стороны также под углом к горизонтальной плоскости отходят перфорированные распределительные трубы, по нижней образующей которых в два ряда расположены отверстия; отверстия перекрыты приваренными щелевыми желобками с шириной щели 0,25 мм. Концы распределительных труб, вставляемые в отверстия коллекторов-отводов, обжаты на конус, а противоположные концы заглушены; места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены нажимными болтами через специальные полосы, прикрепленные с одной стороны к отводам, а с другой к корпусу, и фиксированы прерывистым сварным швом.

Ионитные фильтры смешанного действия с наружной регенерацией (рис. 2.12) представляют собой вертикальные однокамерные цилиндрические аппараты. Каждый фильтр состоит из следующих основных элементов: корпуса, верхнего и нижнего распределительных устройств, распределительных устройств для медленного заполнения фильтра конденсатом после перемешивания отрегенированной шихты сжатым воздухом, трубопроводов, запорной арматуры, пробоотборных устройств и фильтрующей загрузки.

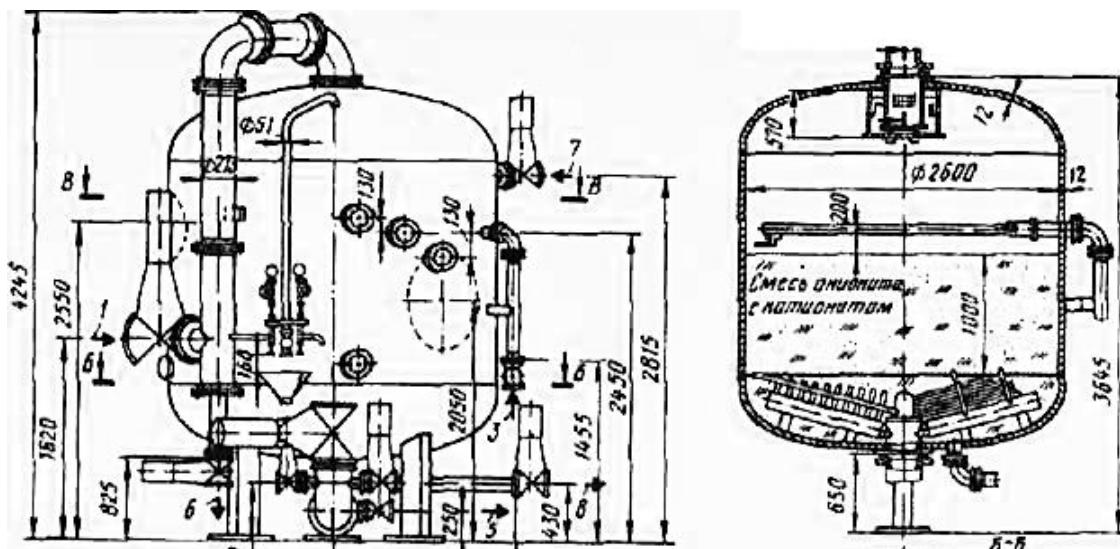


Рис. 2.12. Фильтр ионитный смешанного действия с наружной регенерацией ФИСДНР-2,6-1,0:

- 1 – подвод исходной воды или конденсата; 2 – отвод обработанной воды или конденсата; 3 – подвод воды или конденсата для медленного заполнения;
- 4 – подвод сжатого воздуха; 5 – сброс в дренаж; 6 – сброс в дренаж;
- 7 – гидрозагрузка фильтрующего материала; 8 – гидровыгрузка фильтрующего материала;
- 9 – подвод взрыхляющей воды



Корпус фильтра цилиндрический, сварной из листовой стали, с приваренными эллиптическими штампованными днищами. Корпус фильтра снабжен двумя лазами. Верхний лаз предназначен для загрузки фильтрующего материала, ревизии верхней распределительной системы и периодического осмотра состояния поверхности фильтрующего материала. Через нижний люк выполняют монтаж всех устройств, находящихся внутри корпуса фильтра, периодические осмотры и ремонт нижних распределительных устройств, нанесение антикоррозионных покрытий.

На обечайке корпуса размещены смотровые окна, позволяющие вести наблюдение за слоем ионита, в том числе при гидроперегрузке. В центрах верхнего и нижнего днищ фильтров приварены фланцы, к которым снаружи присоединяют трубопроводы, а внутри – верхнее и нижнее распределительные устройства. Вблизи от центра нижнего эллиптического днища фильтра приварен штуцер для гидравлической выгрузки фильтрующего материала; штуцер для гидравлической загрузки фильтрующего материала приварен вверху цилиндрической части корпуса фильтра.

Верхнее распределительное устройство предназначено для равномерного распределения по сечению фильтра обрабатываемой воды и отвода воды при подрыхлении слоя перед его гидроперегрузкой. Оно состоит из двух вставленных друг в друга перфорированных патрубков, нижний конец которых заглушён; верхний конец внутреннего патрубка соединен с подающей трубой, а наружный патрубок верхним концом прикреплен к верхнему эллиптическому днищу.

Нижнее распределительное устройство предназначено для сбора отработанной воды и конденсата и отмывочной воды, а также для распределения по сечению фильтра взрыхляющей воды и сжатого воздуха. Нижнее распределительное устройство состоит из вертикального патрубка с заглушённым верхним концом, четырех коллекторов-отводов, вставленных в радиально расположенные отверстия вертикального патрубка и размещенных для максимального приближения к днищу фильтра под углом к горизонтальной плоскости. Коллекторы-отводы прикреплены к вертикальному патрубку сваркой. От каждого коллектора-отвода с одной стороны под углом к горизонтальной плоскости отходят перфорированные распределительные трубы, по нижней образующей которых в два ряда расположены отверстия; отверстия перекрывают приваренные щелевые желобки с шириной щели 0,25 мм.

Концы распределительных труб, вставляемые в отверстия коллекторов-отводов, обжаты на конус, а противоположные концы заглушены. Места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены нажимными болтами через специальные полосы, прикрепленные с одной стороны к отводам, а с другой к корпусу, и фиксированы прерывистым сварным швом. Распределительное устройство для медленного заполнения фильтра водой используется после перемещения катионита и анионита в фильтрующей загрузке. Оно представляет собой размещенный по хорде окружности корпуса фильтра коллектор, соединенный с подводящей трубой, к которому подсоединены расположенные в горизонтальной плоскости распределительные трубы с отверстиями. Отверстия размещены на верхней части поверхности труб по двум образующим в шахматном порядке. Наружные концы труб и коллектора заглушены и прикреплены к планкам, приваренным к корпусу фильтра.

Фильтр-регенератор представляет собой вертикальный однокамерный цилиндрический аппарат и состоит из следующих основных элементов: корпуса, верхнего и нижнего распределительных устройств, трубопроводов, запорной арматуры и пробоотборных устройств. Корпус цилиндрический, сварной из листовой стали с приваренными эллиптическими штампованными днищами. К нижнему днищу приварены три опоры для установки регенератора на фундамент. Корпус имеет два лаза, которые позволяют наносить на внутреннюю поверхность защитные коррозионно-стойкие покрытия, производить монтаж и ремонт всех внутренних устройств и выполнять все необходимые работы внутри аппарата. Фильтр-регенератор имеет два смотровых окна для наблюдения за состоянием ионитов во время регенерации и гидроперегрузки.

Верхнее распределительное устройство предназначено для отвода из регенератора воды при взрыхлении и разделении шихты, подвода регенерационного раствора щелочи и воды. Данное устройство состоит из вертикального коллектора с заглушенным нижним концом и радиально расположенными отверстиями, в которые вставлены перфорированные трубы с обжатыми на конус концами; места сочленения труб с коллектором уплотняются нажимными болтами через специальные кронштейны, приваренные к корпусу регенератора. К кронштейнам прикреплены заглушённые концы перфорированных труб. Данные трубы расположены строго горизонтально отверстиями вверх.

Среднее распределительное устройство предназначено для сброса отработавших регенерационных растворов кислоты и щелочи, а также воды при предварительной отмывке катионита и анионита от продуктов

регенерации и остатка регенерационных растворов. Устройство состоит из горизонтального коллектора с отверстиями, в которые вставлены распределительные трубы с обжатыми на конус концами; противоположные концы труб заглушены. Коллектор соединен с наружным трубопроводом. Распределительные трубы перфорированы отверстиями, расположенными по нижней образующей. Отверстия перекрывают приваренные щелевые желобки. Места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены нажимными болтами через специальные полосы, прикрепленные с одной стороны к отводам, с другой к корпусу, и фиксированы прерывистым сварным швом. Среднее распределительное устройство расположено строго горизонтально.

Нижнее распределительное устройство предназначено для подвода воды при взрыхлении и разделении ионитов, сжатого воздуха, регенерационного раствора кислоты, воды при отмывке катионита от продуктов регенерации, а также воды при гидроперегрузке ионитовой шихты в рабочий фильтр. Нижнее распределительное устройство состоит из вертикального коллектора с заглушенным верхним концом, двух коллекторов-отводов, вставленных в радиально-расположенные отверстия коллектора, а также распределительных труб, расположенных в горизонтальной плоскости перпендикулярно к коллекторам-отводам по обе стороны от них. Распределительные трубы составлены из щелевых колец, вставленных одно в другое и насаженных на трубку-стяжку. Места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены болтами через специальные полосы, прикрепленные с одной стороны к отводам, с другой к стенке корпуса регенератора. Нижнее днище под нижним распределительным устройством забетонировано.

## **2.6. Промывка осадков на фильтрах [11]**

Промывка осадка – это процесс извлечения фильтрата из пор осадка другой жидкостью, называемой промывной. Иногда промывку осадка рассматривают как простое вытеснение промывной жидкостью фильтрата, заполняющего поры осадка. Однако в действительности процессы, протекающие в слое осадка при его промывке, значительно сложнее. Во время промывки протекают два или три типа разнохарактерных процессов – гидродинамический, диффузионный и коллоидно- или физико-химический.

При контакте промывной жидкости с фильтратом, в котором растворено вещество, подлежащее вымыванию, наряду с простым вытеснением проходит диффузионный процесс вымывания веществ

из тупиковых пор осадка путем молекулярной диффузии. Часто растворенные в фильтрате вещества бывают адсорбированы на поверхности твердой фазы. В этом случае процесс промывки сопровождается десорбцией вещества с поверхности твердых частиц в промывную жидкость.

На большинстве механизированных фильтров, работающих с тонким слоем осадка, перед промывкой в поры осадка может попасть воздух. В этом случае промывная жидкость не заполняет всех пор осадка и при промывке наблюдается движение газожидкостного потока с присущими ему сложными закономерностями.

В случае промывки агрегированных осадков, при замене фильтрата промывной жидкостью в результате нарушения физико-химического равновесия наблюдается частичное или полное разрушение агрегатов. При этом изменяется пористость осадка и размер пор, по которым течет жидкость, образуются промоины, что дополнительно усложняет изучение процесса. Несмотря на многочисленные исследования, процесс промывки осадков изучен недостаточно.

Предельно упрощенная схема осадка может быть представлена системой параллельных капилляров одинакового диаметра, расположенных по направлению движения потока жидкости, из которых фильтрат равномерно вытесняется промывной жидкостью. Структура осадка, т. е. пористость и диаметр капилляров при таком рассмотрении считаются неизменными во время фильтрования и промывки, и поэтому скорость течения промывной жидкости может рассматриваться как скорость течения последних порций фильтрата через сформированный слой осадка с учетом изменения вязкости.

Более близкая к реальному процессу схема с параллельными капиллярами различного сечения, связанными поперечными порами. Замещение фильтрата в проточных порах разного сечения происходит за неодинаковые промежутки времени, а наличие поперечных проточных пор, связывающих поры разного сечения, вызывает перетоки жидкостей и их смешение в слое осадка. Если содержание вымываемого вещества в исходном фильтрате обозначить через  $c_0$ , мгновенную концентрацию его в выходящей из слоя жидкости – через  $c$ , объем промывной жидкости, вытекшей из пор слоя – через  $V_{пр}$ , а общий объем пор слоя – через  $V_{пор}$ , то изменение концентрации вымываемого вещества в промывном фильтрате можно представить характерными кривыми, изображенными на рис. 2.13. Для предельно упрощенной схемы получим кривую 1 на рис. 2.13. Так как все капилляры одинакового сечения, то весь фильтрат вытесняется из пор одновременно в поршневом режиме.

Для усложненной схемы при вытеснении фильтрата в поршневом режиме кривая 1 на рис. 2.13 принимает вид кривой 2, так как замещение фильтрата в проточных порах разного сечения происходит на неравные промежутки времени.

Иногда процесс промывки, в соответствии с характерными участками на кривой промывки делят на 3 периода (a–b, b–c, c–d). Однако правильнее делить процесс на два периода, в соответствии с преобладающим механизмом извлечения примесей. Если вернуться к упрощенной схеме, то становится ясным, что как участок a–b, так и участок b–c на кривой промывки (рис. 2.13) относятся к первому периоду с преобладающим гидродинамическим удалением примесей – вытеснением фильтрата в поршневом режиме из всех проточных пор различного сечения. Резкое замедление удаления примесей во втором периоде (участок c–d) объясняется тем, что удаление примесей происходит в результате другого, значительно менее эффективного механизма – молекулярной диффузии или десорбции.

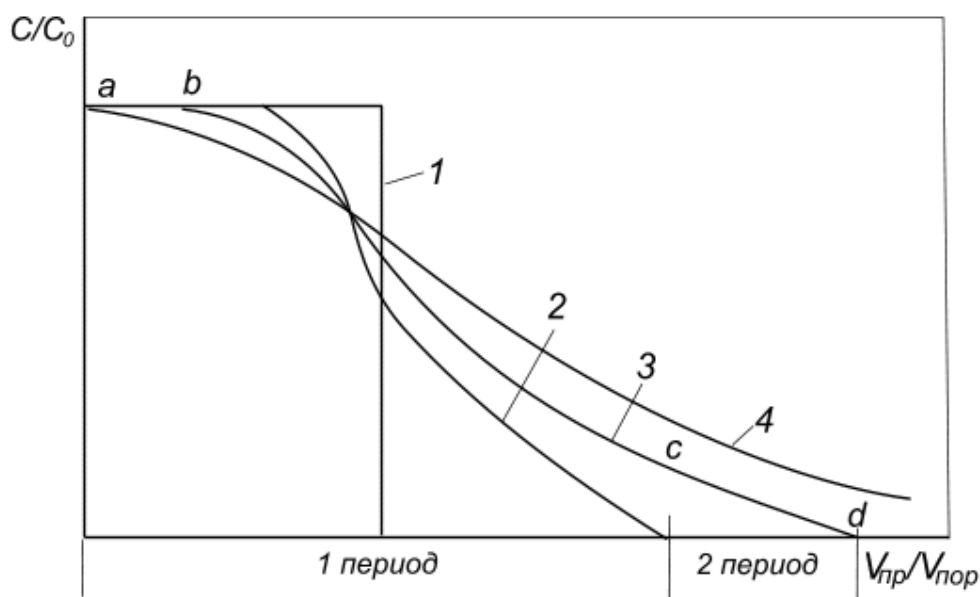


Рис. 2.13. Изменение концентрации вымываемого вещества в вытекающей промывной жидкости:

- 1 – режим поршневого вытеснения из капилляров равного диаметра;
- 2 – кривая, соответствующая структуре осадка с капиллярами различного диаметра, соединяющимися между собой;
- 3 – кривая, соответствующая реальному процессу;
- 4 – кривая, соответствующая режиму полного перемешивания

В первый период примеси вымываются под действием разности давлений. Скорость удаления примесей зависит от скорости течения промывной жидкости, а лимитируется процесс гидравлическим

сопротивлением слоя, определяемым его структурой. Движущей силой во втором периоде является разность концентраций вымываемого вещества в пленке (тупиковых порах) и основном ядре потока (в проточных порах), где промывная жидкость продолжает двигаться в поршневом режиме. Лимитируется процесс диффузионным сопротивлением на границе неподвижной пленки с движущейся жидкостью.

## **2.7. Промывка методом разбавления (репульсионная промывка) [10]**

Промывка методом разбавления – это чередование процессов смешения и разделения осадка и промывной жидкости. Она может быть периодической или непрерывной. Для смешения применяются аппараты с механическими мешалками или барботерами; для разделения – отстойники и сгустители, фильтры и центрифуги.

При применении отстойников-декантаторов промывка называется декантационной. Промывка методом разбавления применяется в тех случаях, когда требуется глубокая и равномерная промывка осадка.

Репульсионную промывку ведут последовательно (прямоточно) или противоточно. При последовательной промывке чистая промывная жидкость подается на каждую ступень промывки. Поэтому последовательная промывка требует большого расхода промывной жидкости и сопровождается получением отработанных промывных жидкостей с низкой концентрацией вымываемого вещества. Отработанная промывная жидкость в этом случае обычно не регенерируется. По этой схеме промывают особо ценные и не токсичные продукты. Качество промывки получается высоким, а промывные воды направляются в канализацию.

Более широко используется противоточная репульсионная промывка, при которой осуществляется встречное движение твердой фазы и промывной жидкости.

Чистая промывная жидкость подается лишь на последнюю ступень промывки. Этот способ используется в тех случаях, когда и осадок и промывная жидкость являются ценными продуктами, подлежащими использованию, или когда отработанная промывная жидкость (промышленные стоки) содержит токсичные вещества, подлежащие выделению и уничтожению.

## 2.8. Очистка конденсатов электромагнитными фильтрами [12]

Для удаления из турбинного конденсата ферромагнитных продуктов коррозии на мощных энергоблоках ТЭС и АЭС используются электромагнитные фильтры (ЭМФ) с единичной производительностью  $1000 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рис. 2.14).

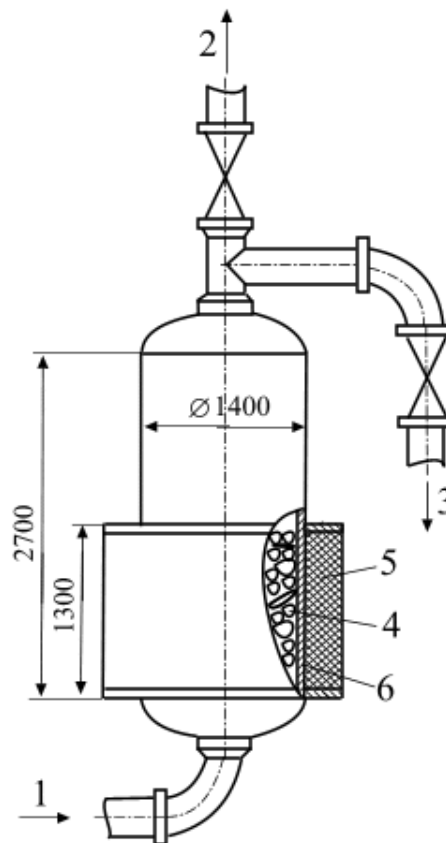


Рис. 2.14. Схема электромагнитного фильтра:

1 – вход конденсата; 2 – выход конденсата; 3 – слив конденсата в дренаж при промывке фильтра; 4 – намагничивающиеся шарики из углеродистой стали; 5 – электрическая катушка для создания магнитного поля; 6 – корпус фильтра из немагнитной аустенитной стали

Корпус ЭМФ заключен в электромагнитную катушку на высоту, равную слою загрузки. Обезжелезивание конденсата в ЭМФ происходит вследствие намагничивания стальной шариковой загрузки с диаметром шариков 6–7 мм и задержания в ней частичек ферромагнитных оксидов железа и шпинелей, которые откладываются в межпоровых объемах вокруг магнитных полюсов контактирующих шариков.

При работе фильтра исходный конденсат под давлением до 1,0 МПа поступает на обработку в ЭМФ, проходит снизу вверх через слой шариковой загрузки и отводится из фильтра при номинальной скорости

фильтрации до 1000 м<sup>3</sup>/ч при потере давления 0,13 МПа. В процессе эксплуатации фильтра контролируется степень обезжелезивания конденсата, которая достигает 50–90 % при остаточном содержании Fe менее 5 мкг/дм<sup>3</sup>.

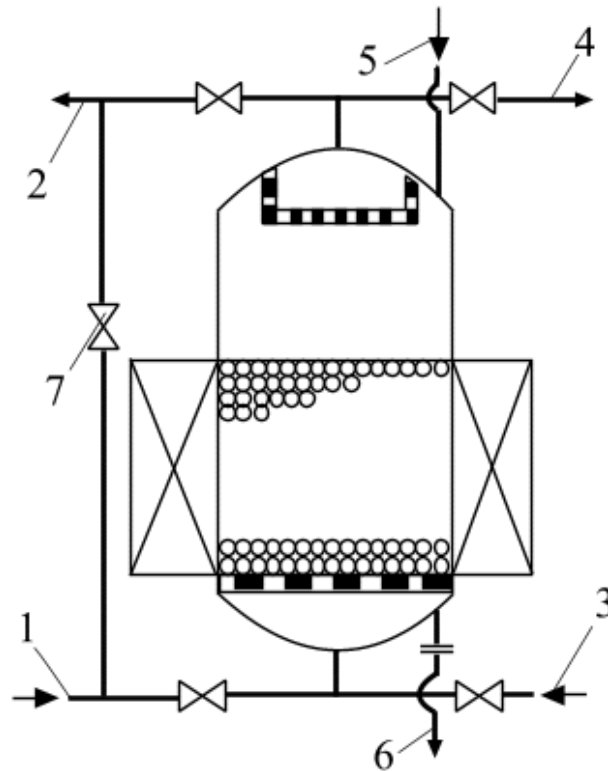


Рис. 2.15. Схема трубопроводов электромагнитного фильтра:

1 – подвод исходного конденсата; 2 – отвод отработанного конденсата;

3 – подвод промывочной воды; 4 – отвод промывочной воды; 5 – загрузка шариков,

6 – выгрузка шариков; 7 – байпасная задвижка.

Железоемкость ЭМФ составляет около 2 г/кг шариковой загрузки при ее массе 6500 кг в ЭМФ-1,1–1,0/1000

По окончании рабочего цикла ЭМФ отключается, после чего осуществляется его промывка, которая происходит в следующем порядке (рис. 2.16).

Открывают байпасную задвижку 7 и закрывают задвижки на линиях 1 и 2. С катушки снимают электрическое напряжение для размагничивания шариковой загрузки. Открывают задвижки на линиях 3 и 4, и фильтр в течение 2 мин промывается водой в направлении снизу вверх с расходом 800–1400 м<sup>3</sup>/ч. По окончании промывки закрывают задвижки на линиях 3 и 4, на катушку подают электронапряжение. Открывают задвижки на линиях 1 и 2 и закрывают байпасную задвижку 7, после чего ЭМФ считается введенным в работу.



Управление технологическим режимом ЭМФ осуществляется устройствами автоматики и питания.

Электромагнитная катушка рассчитана на создание магнитного поля номинальной напряженностью 150 000 А/м. Для большей безопасности ЭМФ должен быть огражден на расстоянии не менее 0,5 м, при этом напряженность магнитного поля за ограждением будет меньше допустимой (8 кА/м). Устройства автоматики и питания со щита с электрическим напряжением 380 В устанавливаются на расстояние менее 5 м.

## 2.9. Очистка конденсатов на намывных фильтрах [12]

Как турбинный, так и производственный конденсаты обычно бывают загрязнены оксидами железа и меди, образующимися в результате коррозии трубопроводов, баков, конденсаторов и теплообменников. Оксиды и гидроксиды Fe находятся в конденсате преимущественно в коллоидной и грубодисперсной формах. Попадая в воду котлов, реакторов, парогенераторов, продукты коррозии участвуют в образовании отложений на теплопередающих поверхностях, а переходя в пар, и на лопаточном аппарате турбины. В пусковые периоды работы энергооборудования концентрация продуктов коррозии в конденсатах может достигать 100–1000 мкг/дм<sup>3</sup>, снижаясь в период стабильной эксплуатации до 10–30 мкг/дм<sup>3</sup> при нормируемых их значениях 2–10 мкг/дм<sup>3</sup>.

Для очистки таких вод, как конденсаты, наряду с насыпными применяются также намывные механические фильтры, в конструкции которых предусмотрена реализация принципа пленочного фильтрования в слоях толщиной 3–5 мм, создаваемых тонкодисперсным материалом с размером частиц 10–60 мкм. Таким материалом является фильтрперлит – порошкообразный материал, полученный измельчением технического перлита – минерала горного происхождения, состоящего из оксидов кремния и алюминия.

Конструктивно намывной фильтр (рис. 2.16) состоит из цилиндрического корпуса 1 с коническим днищем.

Объем фильтра разделен трубной доской 2 на нижнюю и верхнюю части. К трубной доске по всей ее поверхности с шагом около 100 мм снизу подсоединены поддерживающие намытый слой полые фильтрующие элементы 3. Поток обрабатываемой воды, подаваемый снизу, проходит через слой намытого материала, освобождаясь от взвеси, через поры фильтрующего элемента и по внутреннему каналу элемента выводится в объем над трубной доской и далее по трубопроводу отводится из намывного фильтра.

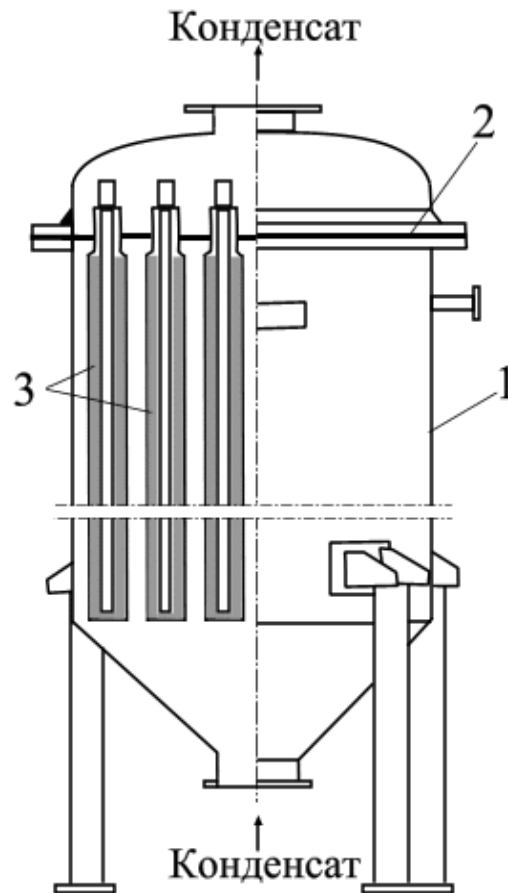


Рис. 2.16. Намывной фильтр

1 – цилиндрический корпус; 2 – трубная доска; 3 – фильтрующие элементы

Работа установки с фильтром намывного типа (рис. 2.17) складывается из трех последовательно проводимых операций:

- намыв фильтрующего слоя;
- фильтрование;
- смыв отработавшего фильтрующего слоя вместе с задержанными примесями.

Перед намывом в мешалке готовят пульпу порошкообразного фильтрующего материала (кроме фильтрперлита используют также диатомит, дробленую целлюлозу, смесь порошкообразных ионитов) с концентрацией  $3 \text{ г/дм}^3$ . Приготовленную пульпу намывают циркуляционным насосом на фильтрующие элементы до переноса всего количества фильтрующего материала, о чем судят по полному осветлению воды, возвращенной из фильтра в мешалку. Расход порошкообразного фильтрующего материала составляет примерно  $0,5 \text{ кг}$  на  $1 \text{ м}^2$  фильтрующей поверхности (свечей).

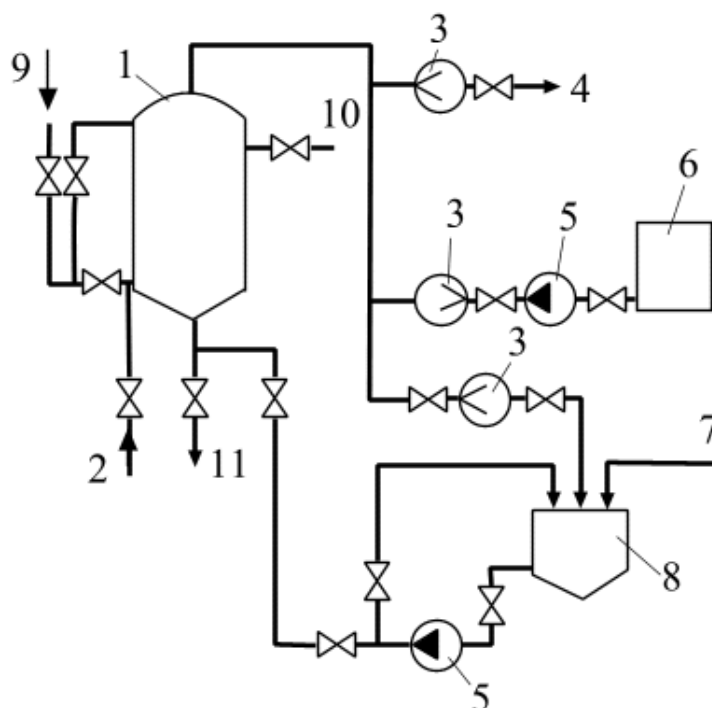


Рис. 2.17. Схема установки с намывным фильтром

- 1 – намывной фильтр; 2 – сжатый воздух; 3 – расходомеры; 4 – фильтр;  
 5 – насос; 6 – бак промывочной воды; 7 – конденсат; 8 – мешалка для приготовления  
 пульпы фильтрующего материала; 9 – конденсат на обработку; 10 – воздушник;  
 11 – дренаж

Очистку воды на намывных фильтрах производят при скорости фильтрования 5–10 м/ч. Во время работы фильтра контролируют перепад давления на фильтрующем слое и концентрацию продуктов коррозии на входе в фильтр и выходе из него, отключая фильтр на промывку при достижении заданного перепада давления. Удаление отработанного рабочего материала проводят обратными потоками воды и воздуха, т. е. в направлении от внутреннего канала фильтрующего элемента к его внешней поверхности. Смытый материал отводится из нижней конусообразной части фильтра в дренаж, так как используется однократно. На очищенные фильтрующие элементы намывается слой свежего порошкообразного материала.

Многолетний промышленный опыт эксплуатации намывных фильтров получен на Ленинградской АЭС, где они используются в системах байпасной очистки вод реактора и контура системы управления и защиты (СУЗ), для очистки замасленных вод взрыхления. Эксплуатация перлитных намывных фильтров позволяет поддерживать концентрацию продуктов коррозии в очищенном конденсате не более  $5 \text{ мкг/дм}^3$ , а масла – около  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ .

## 2.10. Расчет фильтров [11]

При  $\Delta p = \text{const}$  объем фильтрата  $V$ , прошедшего через  $1 \text{ м}^2$  фильтрующей поверхности за время  $\tau$ , и продолжительность фильтрования  $\tau$  связаны уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (2.18)$$

где  $C$  – константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки (ткани),  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;  $K$  – константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с.

Константы  $C$  и  $K$  определяются опытным путем.

Скорость фильтрования [ $\text{в м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ] в данный момент определяется по уравнению:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V + C)}. \quad (2.19)$$

По этому уравнению может быть рассчитана и скорость промывки осадка промывной жидкостью, если вязкость промывной жидкости равна вязкости фильтрата и если промывная жидкость проходит тем же путем, что и фильтрат. При этих условиях скорость промывки равняется скорости фильтрования в конечный момент.

Видоизмененное уравнение (2.19) записывают в форме:

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2}{K}V + \frac{2C}{K}. \quad (2.20)$$

Уравнение выражает прямолинейную зависимость между величинами  $d\tau/dV$  и  $V$  и применяется для определения констант  $C$  и  $K$  по экспериментальным данным. Для этой цели откладывают по оси абсцисс измеренные значения  $V_1, V_2, \dots$ , а по оси ординат – соответствующие измеренные значения  $\Delta\tau_1/\Delta V_1, \Delta\tau_2/\Delta V_2, \dots$

Проведя по экспериментальным точкам прямую, находят затем  $K$  и  $C$  из уравнений  $\text{tg}\beta = 2/K, m = 2C/K$ .

Константа фильтрования  $K$  (в  $\text{м}^2/\text{с}$ ), отнесенная к  $1 \text{ м}^2$  фильтрующей поверхности, при  $\Delta p = \text{const}$  связана с удельным сопротивлением осадка

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu \cdot \rho_{oc} \cdot r}, \quad (2.21)$$

где  $\Delta p$  – перепад давлений на фильтре, Па;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости фильтрата, Па·с;  $r$  – удельное сопротивление осадка (в расчете на 1 кг содержащегося в нем твердого сухого вещества), м/кг;  $\rho_{oc}$  – масса сухого твердого вещества, отлагающегося на фильтре при прохождении через фильтрующую поверхность  $1 \text{ м}^3$  фильтрата,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Величина  $\rho_{oc}$  (в  $\text{кг}/\text{м}^3$ ) может быть выражена через концентрацию фильтруемой суспензии  $x$  следующим образом:

$$\rho_{oc} = \frac{\rho x}{1 - mx}. \quad (2.22)$$

Здесь  $\rho$  – плотность фильтрата,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $x$  – массовая концентрация твердой фазы в суспензии,  $\text{кг}/\text{кг}$ ;  $m$  – масса влажного осадка в расчете на 1 кг содержащегося в нем сухого вещества,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

При постановке значения  $\rho_{oc}$  в уравнение (2.21) получаем следующую формулу для константы  $K$  (в  $\text{м}^2/\text{с}$ ):

$$K = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{\mu \cdot r \cdot x \cdot \rho}. \quad (2.23)$$

Если известна константа фильтрования  $K$ , то удельное сопротивление осадка  $r$  может быть найдено из уравнения (2.21), решенного относительно  $r$ :

$$r = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{K \cdot \mu \cdot x \cdot \rho}. \quad (2.24)$$

Константа фильтрования  $C$  (в  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ), характеризующая сопротивление фильтра и отнесенная к  $1 \text{ м}^2$  поверхности фильтра, при  $\Delta p = \text{const}$  определяется следующим выражением:

$$C = \frac{r_{TK}}{r \cdot \rho_{oc}} \quad (2.25)$$

или

$$C = \frac{r_{\text{TK}}(1-mx)}{r \cdot x \cdot \rho}, \quad (2.26)$$

где  $r_{\text{TK}}$  – удельное сопротивление фильтра (на 1 м<sup>2</sup> поверхности), м/м<sup>2</sup>;  
 $r$  – удельное сопротивление осадка, м/кг.

Следовательно, если значение константы фильтрования  $C$  (м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>) известно, то удельное сопротивление фильтра может быть вычислено по формуле:

$$r_{\text{TK}} = \frac{C \cdot r \cdot x \cdot \rho}{1 - mx}. \quad (2.27)$$

Концентрация промывной воды в любой момент времени от начала основного (диффузионного) периода промывки может быть вычислена по уравнению:

$$Y = Y_1 \cdot e^{-\frac{Kw\tau}{\delta}}. \quad (2.28)$$

Здесь  $Y_1$  – концентрация промывной воды в начале процесса;  $e$  – основание натуральных логарифмов ( $e = 2,718$ );  $K$  – коэффициент, учитывающий физико–химические свойства осадка и промывной воды, а также режим промывки (находится экспериментальным путем);  $w$  – удельная интенсивность промывки или скорость прохождения промывной воды, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с);  $\tau$  – продолжительность промывки, с;  $\delta$  – толщина слоя осадка, м.

Уравнение (2.28) после логарифмирования принимает вид:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\lg Y_1 - \lg Y_2} = \frac{2,3\delta}{Kw}, \quad (2.29)$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – время начала и конца наблюдений в любой период процесса диффузионной промывки;  $Y_1$  и  $Y_2$  – соответствующие концентрации промывной воды.

Из уравнений (2.21) и (2.22) может быть найдена продолжительность промывки  $\tau$ , т. е. время, необходимое для заданного изменения концентрации вымываемого вещества в осадке, а также величина коэффициента  $K$ .

Количество сухого вещества  $G$  (в кг) в осадке, получаемом на фильтре, зависит от количества собранного фильтрата  $V$ , плотности фильтрата  $\rho$ , массовой доли твердой фазы в суспензии  $x$ , влажности осадка (выражаемой массовым соотношением  $m$ ) и может быть вычислена по формуле:

$$G = V \cdot \rho_{\text{ос}} = V \frac{\rho x}{1 - mx}. \quad (2.30)$$

Концентрация твердой фазы в суспензии  $x$  в зависимости от плотности суспензии  $\rho_c$  выражается формулой:

$$x = \frac{(\rho_c - \rho)\rho_{\text{ТВ}}}{(\rho_{\text{ТВ}} - \rho)\rho_c}. \quad (2.31)$$

Плотность суспензии:

$$\rho_c = \frac{n - 1}{\frac{1}{\rho_{\text{ТВ}}} + \frac{n}{\rho}} = \frac{\rho(1 + n)\rho_{\text{ТВ}}}{\rho + \rho_{\text{ТВ}}n}. \quad (2.32)$$

В этих формулах  $x$  – массовая концентрация твердой фазы в суспензии, кг/кг;  $\rho_c$  – плотность суспензии, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ТВ}}$  – плотность твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $n$  – масса жидкой фазы в суспензии на единицу массы твердой фазы, (Т: Ж = 1:n).

По формуле (2.25) можно вычислить и плотность влажного осадка, рассматривая его как концентрированную суспензию.

## 2.11. Примеры расчета

**Пример 2.1.** Определить продолжительность фильтрования 10 дм<sup>3</sup> жидкости через 1м<sup>2</sup> фильтра, если при предварительном испытании фильтра с 1м<sup>2</sup> было собрано фильтрата: 1дм<sup>3</sup> через 2,25 мин и 3дм<sup>3</sup> через 14,5 мин после начала фильтрования.

**Решение.** По опытным данным находим экспериментальные константы  $K$  и  $C$  в уравнении фильтрования:

$$V^2 + 2VC = K\tau.$$

Для этого составляем два уравнения с двумя неизвестными:

$$1^2 + 2 \cdot 1 \cdot C = K \cdot 2,25; \quad 3^2 + 2 \cdot 3 \cdot C = K \cdot 14,5,$$

откуда  $K = 0,77 \text{ дм}^6/(\text{м}^4 \cdot \text{мин})$  и  $C = 0,37 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ .

**Пример 2.2.** В условиях предыдущей задачи определить длительность промывки осадка, если количество промывной воды составляет  $2,4 \text{ дм}^3/\text{м}^2$  и промывка идет по линии основного фильтрата.

**Решение.** Пренебрегая различием в динамических коэффициентах вязкости фильтрата и промывной воды, будем считать, что скорость промывки равна скорости фильтрования в конечный момент.

Скорость фильтрования в конечный момент определим по уравнению (2.18) с использованием данных предыдущего примера:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V + C)} = \frac{0,77}{2(10 + 0,37)} = 0,037 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Продолжительность промывки:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{(dV/d\tau)_{\text{пр}}} = \frac{2,4}{0,037} = 65 \text{ мин.}$$

**Пример 2.3.** Во время опытного фильтрования водной суспензии с содержанием 13,9 % карбоната кальция при 20 °С на лабораторном фильтрпрессе с  $F = 0,1 \text{ м}^2$  и толщиной осадка 50 мм были получены данные, приведенные в таблице 2.1.

Определить константы фильтрования:  $K$  (в  $\text{м}^3/\text{ч}$ ) и  $C$  (в  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ).

Таблица 2.1.

При избыточном давлении		Собрано фильтрата, дм <sup>3</sup>	Время от начала опыта, с
Па	кгс/см <sup>2</sup>		
3,43·10 <sup>4</sup>	0,35	2,92	146
		7,80	888
10,3·10 <sup>4</sup>	1,05	2,45	50
		9,80	660



**Решение.** Численные значения констант фильтрования найдем из уравнения (2.17):

При избыточном давлении  $3,43 \cdot 10^4$  Па ( $0,35$  кгс/см<sup>2</sup>) результаты опытов дают:

$$V_1 = \frac{2,92}{1000 \cdot 0,1} = 2,92 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2; \quad \tau_1 = \frac{146}{3600} = 0,0405 \text{ ч};$$

$$V_2 = \frac{7,8}{1000 \cdot 0,1} = 7,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2; \quad \tau_2 = \frac{888}{3600} = 0,246 \text{ ч}.$$

Подставляем пересчитанные величины в уравнение (2.17) и решаем систему уравнений:

$$(2,92 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 2,92 \cdot 10^{-2} C = K \cdot 0,0405;$$

$$(7,8 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-2} C = K \cdot 0,246,$$

откуда  $K = 278 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ ;  $C = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2$ .

**Пример 2.4.** В условиях предыдущего примера рассчитать удельное сопротивление осадка карбоната кальция. Дополнительно известно, что влажность осадка при  $p_1 = 3,43 \cdot 10^4$  Па ( $0,35$  кгс/см<sup>2</sup>) равнялась 37 %, а при  $p_2 = 10,3 \cdot 10^4$  Па ( $1,05$  кгс/см<sup>2</sup>) – 32 % от массы влажного осадка.

**Решение.** Удельное сопротивление осадка рассчитываем по формуле (2.24). Давление фильтрования  $\Delta p = p_1 = 3,43 \cdot 10^4$  Па.

Плотность фильтрата  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Динамический коэффициент вязкости фильтрата при 20 °С:

$$\mu = \frac{1}{3600} 10^{-3} = 27,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}).$$

Константа фильтрования (при давлении  $p_1 = 3,43 \cdot 10^4$  Па)  
 $K = 278 \cdot 10^4 \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Массовая доля твердой фазы в суспензии  $x = 0,139$ .

Массовое отношение влажного осадка к сухому  $m = 1/(1-0,37) = 1,59$ .

Количество фильтрата на 1 кг суспензии  $1 - mx = 1 - 1,59 \cdot 0,139 = 0,799$ .

Найденные величины подставляем в формулу (2.24):

$$r = \frac{2p(1-mx)}{K\mu r x} = \frac{2 \cdot 3,43 \cdot 10^4 \cdot 0,779}{278 \cdot 10^{-4} \cdot 27,8 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \cdot 0,319} = 5 \cdot 10^{10} \frac{м}{кг \text{ сухого осадка}}.$$

При давлении фильтрования  $10,3 \cdot 10^4$  Па, т.е.  $1,05 \text{ кгс/см}^2$ , имеем:

$$K = 560 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}; \quad m = \frac{1}{1-0,32} = 1,47 ;$$

$$1 - mx = 1 - 1,47 \cdot 0,139 = 0,795.$$

Остальные величины имеют те же значения, что и при  $p_1 = 3,43 \cdot 10^4$  Па, т.е.  $0,35 \text{ кгс/см}^2$ .

Новое удельное сопротивление осадка можно найти путем подстановки численных значений этих величин в формулу или из соотношения:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\Delta p_2 K_1 (1-mx)_2}{\Delta p_1 K_2 (1-mx)_1} = \frac{10,3 \cdot 10^4 \cdot 278 \cdot 10^{-4} \cdot 0,795}{3,43 \cdot 10^4 \cdot 560 \cdot 10^{-4} \cdot 0,779} = 1,52 ,$$

откуда  $r_2 = 5 \cdot 10^{10} \cdot 1,52 = 7,6 \cdot 10^{10}$  м/кг сухого осадка.

**Пример 2.5.** Сколько времени необходимо отмывать осадок на фильтр-прессе от NaCl, чтобы достигнуть концентрации  $5 \text{ г/дм}^3$ , допустимой в промывной воде? Промывка ведется чистой водой. Интенсивность промывки  $0,33 \text{ м}^3/\text{дм}^3$ . Толщина слоя осадка 35 мм. Константа промывки  $K = 520 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ . В начальный момент промывки концентрация NaCl в промывной воде  $143 \text{ г/дм}^3$ .

**Решение.** Воспользуемся уравнением (2.29), подставив в него заданные величины в соответствующих единицах измерения:  $\delta = 0,035 \text{ м}$ ;  $w = 0,33 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;  $K = 520 \cdot 0,001 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Тогда

$$\tau = \frac{2,3 \cdot 0,035}{520 \cdot 0,001 \cdot 0,33} (\lg 143 - \lg 5) = 0,683 \text{ ч} = 41 \text{ мин.}$$

### Контрольные вопросы

1. Поясните сущность процесса фильтрации.
2. При каких условиях происходит процесс фильтрации?
3. Запишите основное дифференциальное уравнение фильтрации.
4. Из каких материалов изготавливают фильтровальные перегородки?  
От чего зависят размеры и форма фильтровальных перегородок?
5. Характеристики фильтрующих материалов.
6. Основные конструкции фильтров.
7. Типы осветительных фильтров, используемых в водоподготовке.
8. Особенности конструкций осветительных фильтров.
9. Виды ионитных фильтров.
10. Особенности конструкции фильтров смешанного действия.
11. Какой процесс называют промывкой осадка?
12. Назовите и поясните механизмы фильтрации, наблюдаемые при работе осветительных фильтров различных типов.
13. Принимая диаметр зерна фильтрующего материала а) 1,0 мм, б) 0,4 мм и в) 0,04 мм, а размер удаляемых ГДП равным 10 мкм, оцените расчетом для каждого из типов загрузки механизм фильтрации.
14. Назовите стадии, из которых состоит процесс выведения ГДП при объемном фильтровании.
15. Какие требования предъявляются к фильтрующим материалам?
16. Какими методами удаляются задержанные примеси из насыпных фильтров?
17. В чем состоит отличие принципов действия ЭМФ от принципов действия фильтров, загруженных дробленым антрацитом?
18. Какие показатели контролируются при работе намывных фильтров?

## ГЛАВА 3

РАЗДЕЛЕНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ  
В ПОЛЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

## 3.1. Описание процесса

Наиболее эффективным процессом разделения жидкостей от дисперсной фазы является центрифугирование [11, 13].

Под центрифугированием понимают процесс разделения неоднородных систем, в частности эмульсий и суспензий, в поле центробежных сил с использованием сплошных или непроницаемых для жидкости перегородок. В аппаратах со сплошными стенками производят разделение суспензий и эмульсий по принципу отстаивания, причём действие силы тяжести заменяется действием центробежной силы. В аппаратах с проницаемыми стенками осуществляется процесс разделения суспензий по принципу фильтрования, причём вместо разности давлений используется действие центробежной силы.

Разделение неоднородных систем центрифугированием, с физической точки зрения, можно рассматривать как процесс свободного или стесненного осаждения взвешенных частиц в жидкости под действием центробежного силового поля. Взвешенные частицы могут быть твёрдыми или жидкими. В первом случае процесс осуществляют в центрифугах, а во втором – в сепараторах.

Центробежная сила возникает при вращении центрифуги и находящейся в ней жидкости. Она возникает, как сила инерции при вращательном движении тел, и направлена всегда по радиусу от оси вращения к периферии. Если обозначить:  $G$  – вес вращающегося тела;  $r$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести тела;  $\omega$  – угловая скорость вращения, то центробежную силу  $C$  можно определить следующим уравнением:

$$C = G \frac{\omega^2 r}{g} = GFr, \quad (3.1)$$

где  $\frac{\omega^2 r}{g} = Fr$  – критерий Фруда. Он определяется центробежной силой, развиваемой 1 кг веса тела, и называется фактором разделения. Критерий Фруда  $Fr$  показывает во сколько раз центробежная сила больше силы тяжести.

Центробежная сила пропорциональна величине радиуса  $r$  и квадрату числа оборотов. Поэтому ее увеличивать целесообразнее за счет увеличения числа оборотов, а не за счет увеличения радиуса. На повышение давления одинаково влияют и рост числа оборотов, и удлинение радиуса  $r$ .

Произведение фактора разделения  $Fr$  на поверхность осаждения твёрдой фазы в роторе центрифуги  $S$  называется индексом производительности центрифуги и обозначается  $\Sigma$ :

$$\Sigma = FrS. \quad (3.2)$$

Индекс производительности  $\Sigma$  численно равен поверхности осаждения отстойника, в котором достигается та же производительность, что и в центрифуге. Величина  $\Sigma$  характеризует влияние конструктивных факторов на способность центрифуги разделять данную неоднородную систему.

Общие закономерности центрифугирования имеют сходство с закономерностями отстаивания и фильтрования. Однако процессы в отстойных и фильтрующих центрифугах сложнее соответствующих процессов в отстойниках и фильтрах. Это обусловлено тем, что в центрифугах вместо силы тяжести и разности давлений действует центробежная сила, достигающая значительной величины, а вместо плоских слоев жидкости и осадка образуются слои с цилиндрическими граничными поверхностями, усложняющими зависимость процесса от геометрических факторов.

Разделение эмульсий в отстойных центрифугах обычно называют сепарацией, а устройства, в которых осуществляется этот процесс, – сепараторами. Примером такого процесса является отделение сливок от молока.

Центрифугирование применяют для разделения суспензий, шламов, эмульсий и растворов. Разделение суспензии в фильтрующих центрифугах называют центробежным фильтрованием. Примером такого процесса является отделение маточного раствора от нитрофенола. Разделение технических суспензий производится как по принципу отстаивания в сплошных барабанах, так и по принципу фильтрования в перфорированных барабанах.

Центрифугирование в отстойных барабанах – это технологический процесс, включающий две основные стадии: 1) осаждение твердой фазы и 2) уплотнение осадка. Обычно этот процесс применяют для разделения суспензий с мелко и среднезернистой твёрдой фазой. При этом, можно очищать жидкости как от загрязнений, содержащихся в больших

количествах (центробежное отстаивание), так и от незначительного количества твёрдой фазы (центробежное осветление).

Центробежное отстаивание в большинстве случаев не дает хорошего разделения. После центрифугирования получают более или менее загрязненный фугат и влажный осадок. Относительно большое содержание твёрдой фазы в суспензиях не позволяет в производственных условиях применять скоростные центрифуги.

В отличие от центробежного отстаивания центробежное осветление применяют главным образом для очистки жидкости от тонких суспензий и от коллоидных частиц. Центрифугирование в сплошных роторах применяют также для разделения эмульсий. Под действием поля центробежных сил компоненты эмульсии в барабане располагаются в виде концентрических слоёв: наружного слоя более тяжелой жидкости и внутреннего слоя жидкости, имеющего меньшую плотность. Жидкость из слоёв выводится наружу порознь.

Разделение суспензий и шламов в перфорированных барабанах, покрытых изнутри пористой тканью, называют центробежным фильтрованием. На фильтрующей ткани оседает твёрдая фаза, а жидкость проходит сквозь поры осадка и ткани и удаляется наружу через отверстие в барабане. Центробежное фильтрование можно рассматривать как процесс, включающий следующие три стадии:

- 1) фильтрование с образованием осадка;
- 2) отжим жидкости и уплотнение осадка;
- 3) удаление из осадка жидкости, удерживаемой в местах соприкосновения частиц и на их поверхности.

Для отделения от жидкости дисперсной фазы, находящейся в ней в состоянии тонкого измельчения (желатин, клей и др.), применяют центрифуги, в которых барабан вращается с повышенной скоростью – до 40 тыс. об/мин. Такие аппараты, называемые сверхцентрифугами, применяют, например, для выделения жира из промывных вод и для извлечения воды из минеральных масел.

Процессы центрифугирования осуществляются периодически или непрерывно.

### 3.2. Устройство центрифуг

*Гидроциклоны.* Принцип действия гидроциклонов основан на сепарации частиц твердой фазы во вращающемся потоке жидкости. Величина скорости сепарирования частицы в центробежном поле гидроциклона может превышать скорость осаждения эквивалентных частиц в поле гравитации в сотни раз [10].

Основные преимущества гидроциклонов:

- высокая удельная производительность по обрабатываемой суспензии;
- сравнительно низкие расходы на строительство и эксплуатацию установок;
- отсутствие вращающихся механизмов, предназначенных для генерирования центробежной силы;
- центробежное поле создается за счет тангенциального ввода сточной воды.
- возможность создания компактных автоматизированных установок.

Интенсификацию процессов осаждения взвешенных частиц из сточных вод осуществляют воздействием на них центробежных и центростремительных сил в низонапорных (открытых) и напорных гидроциклонах. Вращательное движение жидкости в гидроциклоне, приводящее к сепарации частиц, обеспечивается тангенциальным подводом воды к цилиндрическому корпусу. Вращение потока способствует агломерации частиц и увеличению их гидравлической крупности.

Открытые гидроциклоны применяют для выделения из сточных вод тяжелых примесей, характеризующихся гидравлической крупностью более 0,2 мм/с, и скоагулированных взвешенных веществ.

Часто их используют в качестве первой ступени в комплексе с другими аппаратами для механической очистки сточных вод. Значительное преимущество открытых гидроциклонов – большая удельная производительность  $[2-20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})]$  при небольших потерях напора (не более 0,5 м). Число впускных патрубков в гидроциклоне для более равномерного распределения потока должна быть не менее двух. Скорость впуска воды равна 0,1–0,5 м/с.

Применяются открытые гидроциклоны двух типов (рис. 3.1):

- без внутренних устройств для выделения из сточных вод крупных и мелкодисперсных взвешенных веществ;
- с конической диафрагмой и внутренним цилиндром для выделения оседающих и всплывающих мелкодисперсных взвешенных веществ.

Часто их используют в качестве первой ступени в комплексе с другими аппаратами для механической очистки сточных вод. Значительное преимущество открытых гидроциклонов – большая производительность  $[2-20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})]$  при небольших потерях (не более 0,5 м). Число впускных патрубков в гидроциклоне для равномерного распределения потока должно быть не менее двух. Скорость впуска воды равна 0,1–0,5 м/с.

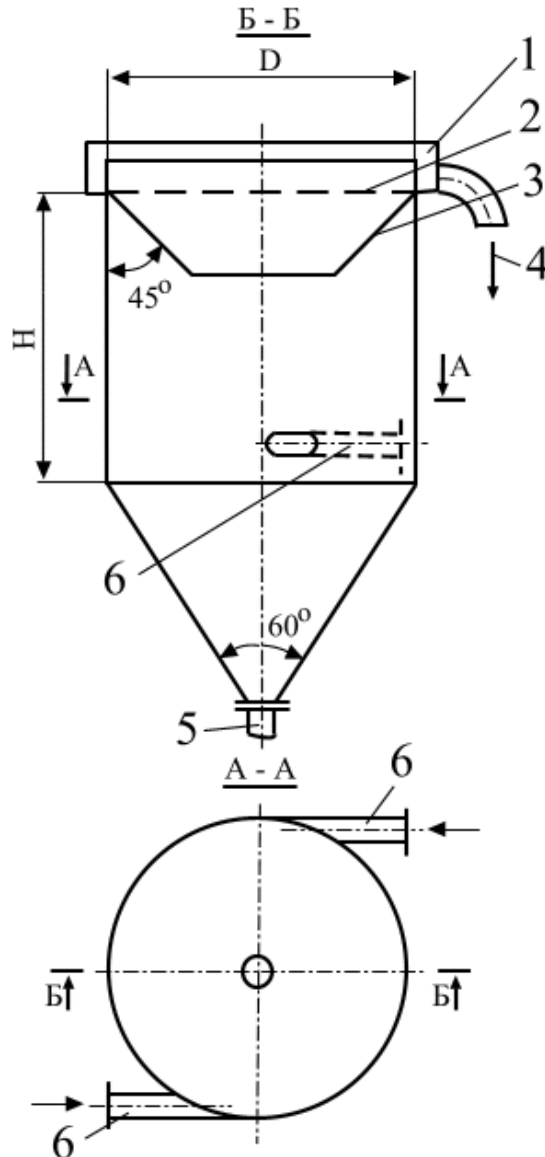


Рис. 3.1. Открытый гидроциклон с конической диафрагмой:  
 1 – периферический водослив; 2, 3 – соответственно плоская и коническая диафрагмы;  
 4 – отвод осветленной воды; 5 – отверстие для удаления шлама;  
 6 – подача сточной воды

Применяются открытые гидроциклоны следующих типов:

- без внутренних устройств для выделения из сточных вод крупных и мелкодисперсных взвешенных веществ;
- с конической диафрагмой и внутренним цилиндром для выделения оседающих и всплывающих мелкодисперсных взвешенных веществ;
- многоярусный с наклонными выпусками осветленной воды из каждого яруса для выделения крупных и мелкодисперсных взвешенных веществ;
- многоярусный с периферийным отбором осветленной воды для выделения оседающих крупно- и мелкодисперсных взвешенных веществ.



Многоярусные гидроциклоны (рис. 3.2) используют для интенсификации процесса очистки.

В них рабочий объем разделен на отдельные ярусы со свободно вставляемыми коническими диафрагмами. Вследствие этого высота слоя отстаивания уменьшается. Вращательное движение позволяет полнее использовать объем яруса и способствуют агломерации взвешенных частиц. Каждый ярус гидроциклона работает самостоятельно.

В конструкции многоярусного гидроциклона совмещены принципы работы открытого гидроциклона и тонкослойного отстойника, что позволяет получить высокую эффективность очистки при удельных гидравлических нагрузках, в 8–10 раз и более превышающих нагрузки на обычные отстойники. Очищаемая сточная вода подается тангенциально через три щели.

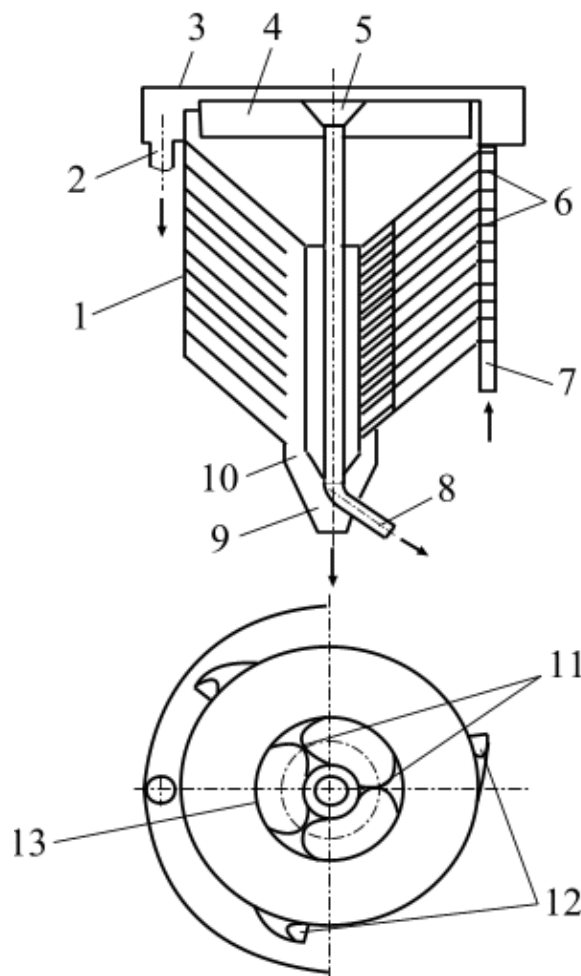


Рис. 3.2. Многоярусный открытый гидроциклон:

- 1 – конические диафрагмы; 2 – отвод воды; 3 – лоток; 4 – водослив;  
 5 – маслосборная воронка; 6 – распределительные лотки; 7 – подача сточной воды;  
 8 – отвод масла; 9 – удаление шлама; 10 – шламоотводящая щель;  
 11 – наклонные выпуски; 12 – аванкамеры; 13 – шламоотсекающая диафрагма

Выбор типа гидроциклона в каждом конкретном случае следует определять технико-экономическим сравнением вариантов. Основная расчетная величина открытых гидроциклонов – удельная гидравлическая нагрузка  $q$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , определяемая по формуле:

$$q = 3,6kw_0, \quad (3.3)$$

где  $w_0$  – гидравлическая крупность частиц, которые необходимо выделить для обеспечения требуемого эффекта; определяется по кривым кинетики осаждения, получаемым в лабораторных условиях при отстаивании исходной сточной воды в состоянии покоя в слое  $h = 200$  мм;

$k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа гидроциклона и равный: 0,61 для гидроциклона без внутренних устройств; 1,98 для гидроциклона с конической диафрагмой и внутренним цилиндром.

Для многоярусных гидроциклонов:

– с наклонными выпусками:

$$k = \frac{0,75n(D^2 - d^2)}{D^2}, \quad (3.4)$$

где  $n$  – число ярусов;

$D$  – диаметр гидроциклона;

$D$  – диаметр оружности, на котором располагаются раструбы выпусков.

– с периферийным отбором осветленной воды:

$$k = \frac{1,5n(D^2 - d^2)}{D^2}, \quad (3.5)$$

где  $n$  – число пар ярусов;

$D$  – диаметр гидроциклона;

$d$  – диаметр отверстия средней диафрагмы паря ярусов.

Производительность одного аппарата  $Q$   $\text{м}^3/\text{ч}$ , определяется по формуле:

$$Q = 0,785qD^2. \quad (3.6)$$

Формула для расчета содержания взвешенных веществ  $C_{\text{осв}}$ , г/л, в осветленной воде для открытого гидроциклона:

$$C_{\text{осв}} = Aq/H, \quad (3.7)$$

где  $A$  – коэффициент, равный при работе без коагулирования 0,075 и с коагулированием – 0,33.

Скорость восходящего потока в аванкамере принимают равной 0,5 м/с. Основные параметры многоярусного гидроциклона следующие: диаметр гидроциклона 2–6 м, высота яруса  $h_{\text{яр}} = 100\text{--}250$  мм, число ярусов 4–20, диаметр центрального отверстия в диафрагме  $d = 0,6\text{--}1,4$  м, ширина шламовыводящей щели  $D = 100\text{--}150$  мм, число впусков  $n_1 = 3$ , скорость потока на входе  $v_1 = 0,3\text{--}0,4$  м/с, число выпусков  $n_2 = 2\text{--}3$ , скорость потока на выходе из яруса  $v_2 \leq 0,1$  м/с, зазор между корпусом и конической диафрагмой  $\Delta R = 50\text{--}70$  мм, угол конуса диафрагмы  $\alpha = 60\text{--}90^\circ$ .

Напорные гидроциклоны применяют для выделения из производственных сточных вод грубодисперсных примесей, главным образом минерального происхождения, плотность которых отличается от плотности жидкой среды сточных вод (рис. 3.3) [10].

Сточная вода под давлением поступает по тангенциально расположенному вводу в верхнюю часть цилиндра и приобретает вращательное движение. Возникающие центробежные силы перемещают частицы примесей к стенкам аппарата по спиральной траектории вниз к выходному патрубку. Очищенная вода удаляется через верхний патрубок. Фактор разделения напорных гидроциклонов достигает 2000, что обуславливает их высокую эффективность. Гидроциклоны могут иметь диаметры от 15 до 1000 мм.

Напорные гидроциклоны могут быть единичными и батарейными (мультигидроциклоны); используются при осветлении сточных вод для сгущения осадка, обогащения известкового молока и твердой фазы сточных вод в процессе их утилизации. При осветлении производственных сточных вод мультигидроциклоны обеспечивают высокую степень очистки.

Основное влияние на процесс разделения оказывает окружная скорость движения, величина которой определяет интенсивность вращения жидкости, и следовательно, фактора разделения. Конструктивные размеры напорных гидроциклонов подбирают в зависимости от количества сточных вод, концентрации и свойств примесей.

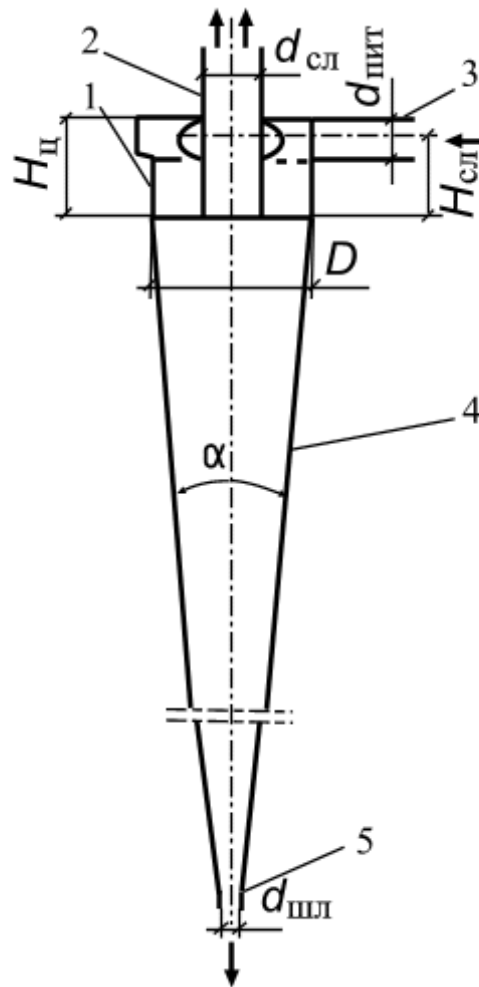


Рис. 3.3. Напорный гидроциклон:

1 – цилиндрическая часть циклона; 2 – сливной патрубок; 3 – тангенциальный патрубок; 4 – коническая часть циклона; 5 – шламовая насадка

Суммарная производительность напорных гидроциклонов определяется в зависимости от конструктивных размеров аппаратов, давления питания и гидродинамических условий выхода жидкости и шлама. В большинстве случаев напорные гидроциклоны работают без противодействия со стороны сливного и шламового патрубков, т.е. давление на выходе из сливного и шламового патрубков соответствует атмосферному ( $p_{сл} = p_{ат}$ ,  $p_{шл} = p_{ат}$ ).

Производительность гидроциклона назначенных размеров  $Q_{пит}$ , л/с, рассчитывают по формуле:

$$Q_{пит} = 0,017D^{0,525} d_{пит}^{1,279} d_{сл}^{0,4046} d_{шл}^{0,1434} \alpha^{0,0258} H_{ц}^{0,0149} p_{пит}^{0,443}, \quad (3.8)$$

где  $D$ ,  $d_{пит}$ ,  $d_{сл}$ ,  $d_{шл}$ ,  $H_{ц}$  даны в см;  $\alpha$  – в град;  $P_{пит}$  – в МПа.

Требуемое число напорных гидроциклонов  $n_{\text{раб}}$  определяется с учетом обеспечения расчетной производительности установки и надежности работы, т. е.:

$$n_{\text{раб}} = Q/Q_{\text{пит}}, \quad (3.9)$$

где  $Q$  – расчетная производительность установки.

Расход шлама  $Q_{\text{шл}}$ , л/с, определяют по формуле:

$$Q_{\text{шл}} = \frac{D^{0,45} d_{\text{пит}}^{0,24} d_{\text{шл}}^{2,86} H_{\text{ц}}^{0,09}}{d_{\text{сл}}^{2,318} \alpha^{0,46} \rho_{\text{пит}}^{0,32}}. \quad (3.10)$$

Эффективность осветления сточных вод в гидроциклонах рассчитывают на основе результатов анализов гранулометрического состава частиц твердой фазы. Располагая графическим представлением интегрального распределения частиц по их геометрическим размерам и гидравлической крупности, а также по расчетным значениям граничной крупности разделения в гидроциклоне – максимальным размерам частиц твердой фазы, уносимых жидкостью, определяют количество твердой фазы (в %), выделенной в аппарате.

Гидравлическую крупность находят по упрощенной формуле:

$$w_0 = 15,33 \frac{k_T D^2}{\alpha_c Q_{\text{пит}}}, \quad (3.11)$$

где  $Q_{\text{пит}}$  – производительность гидроциклона, м<sup>3</sup>/с;

$k_T$  – коэффициент, учитывающий влияние концентрации примесей и турбулентность потока (для агрегативно-устойчивых суспензий с небольшой концентрацией  $k = 0,04$ );

$\alpha_c$  – коэффициент, учитывающий затухание тангенциальной скорости (равен 0,45).

Граничная крупность разделения  $\delta$ , мкм, определяется по формуле:

$$\delta = 2,7 \frac{D^{0,543} d_{\text{пит}}^{1,643} d_{\text{сл}}^{0,014} \mu^{0,5}}{d_{\text{шл}}^{0,57} H_{\text{ц}}^{0,507} H_{\text{к}}^{0,714} (\gamma_T - \gamma_c) \rho_{\text{пит}}^{0,222}}. \quad (3.12)$$

Количество воды, проходящей через сливной и шламовый патрубки:

$$q_{\text{сл}} = Q \frac{d_{\text{сл}}^2}{d_{\text{сл}}^2 + d_{\text{шл}}^2}; \quad (3.13)$$

$$q_{\text{шл}} = Q \frac{d_{\text{шл}}^2}{d_{\text{шл}}^2 + d_{\text{сл}}^2}. \quad (3.14)$$

При выборе конструкций напорных гидроциклонов необходимо учитывать требуемую эффективность разделения сточных вод; абразивные свойства твердой фазы; химическую агрессивность жидкой фазы; предельное давление перед аппаратом и требуемое давление в сливном трубопроводе; гранулометрический состав и плотность частиц твердой фазы; механическую прочность частиц твердой фазы суспензии; производительность установки.

*Напорный мультициклон* [5]. Чем меньше диаметр гидроциклона, тем больше развивающиеся в нем центробежные силы и тем меньше размер задерживаемых в гидроциклоне частиц. Большая эффективность разделения достигается в гидроциклоне вытянутой формы с возможно малым углом конусности. Поэтому для задержания тонкодисперсной взвеси используют гидроциклоны малого диаметра, устанавливая их параллельно в большом количестве. Такой аппарат называют мультициклоном (рис. 3.4).

Пластмассовые мультициклоны диаметром 10, 15 и 20 мм способны задерживать частицы взвеси гидравлической крупности до 0,17 мм/с при потере напора около 0,1 МПа. Подача одного гидроциклона диаметром 15 мм при этой потере напора составляет около 0,07 м<sup>3</sup>/ч. Подача мультициклона диаметром 1,0 м, состоящего из 320 таких гидроциклонов, составляет порядка 500 м<sup>3</sup>/сут.

При расчете гидроциклона первоначально по кривой осаждения взвеси определяют расчетную гидравлическую крупность извлекаемых примесей. Затем по графику [5] находят диаметр аппарата и последующим технико-экономическим расчетом уточняют его параметры. Следует иметь в виду, что эффект осветления воды в гидроциклонах возрастает с увеличением нагрузки по воде, что позволяет не предусматривать резерва на случай ремонта или замены.

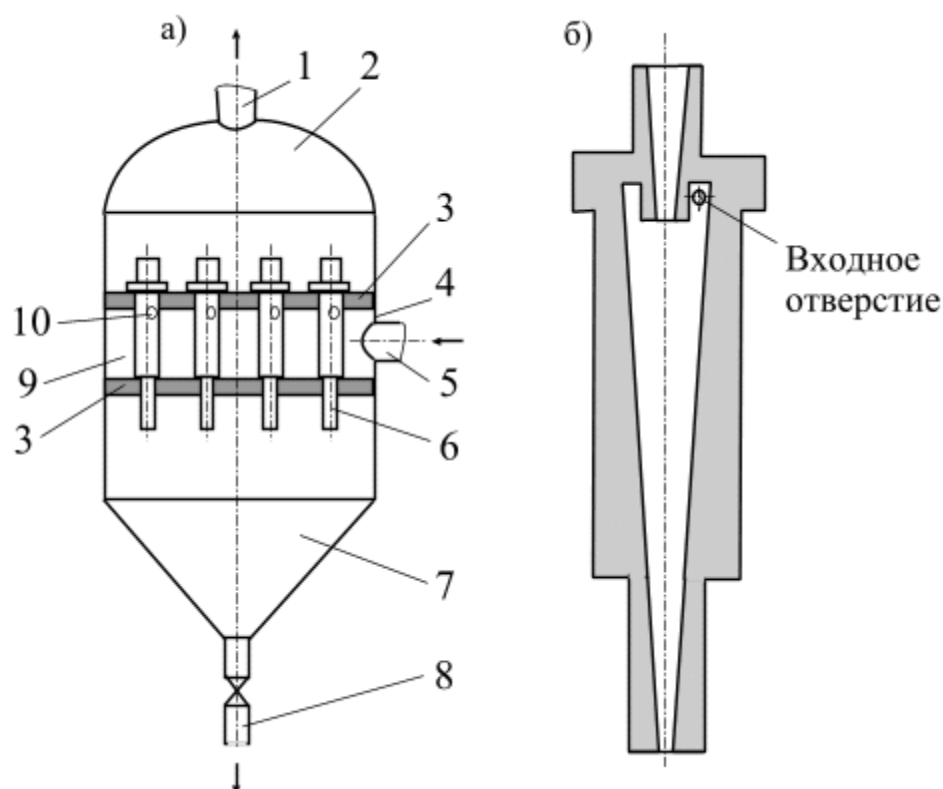


Рис. 3.4. Схема мультициклона (а) и гидроциклона (б)  
диаметром 15 мм (1,5 мм):

- 1, 5 – сливной и питающий патрубки; 2, 9 – камера сбора осветленной и распределения исходной воды; 3 – разделительные плиты;  
4 – цилиндрическая часть аппарата; 6 – гидроциклоны диаметром 10 мм (15 или 20 мм);  
7 – шламовая камера; 8 – патрубок сброса шлама; 10 – входное отверстие

Гидроциклоны целесообразно использовать в системах хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения для предварительного осветления поверхностных вод, обладающих высокой кратковременной мутностью (более 1500 мг/л). Для осветления воды следует применять гидроциклоны литые нефутерованные, как наиболее дешевые и достаточно стойкие против истирания. В НИИ ВОДГЕО разработаны открытые многоярусные гидроциклоны, которые могут быть использованы для частичного осветления воды перед поступлением ее на основные очистные сооружения.

Применение гидроциклонов вследствие их небольшой стоимости позволяет сократить затраты на строительство и эксплуатацию сооружений для предварительного осветления воды.

Центрифуги. Центрифугирование для очистки сточных вод используется реже, чем методы осаждения и фильтрования. Это связано с тем, что центрифугирование является процессом энергоемким.

Условия применения центрифуг:

- локальная очистка производственных сточных вод, когда осадок предстает собой ценный продукт, который может быть утилизирован;
- мелкодисперсный состав загрязнений, когда для их выделения не могут быть применены реагенты.

Центрифуга представляет собой в простейшем виде вертикальный цилиндрический ротор со сплошными или перфорированными боковыми стенками [11, 13]. Ротор укрепляется на вертикальном валу, который приводится во вращение электродвигателем, и помещается в соосный цилиндрический неподвижный кожух, закрываемый съемной крышкой; на внутренней поверхности ротора с перфорированными стенками находится фильтровальная ткань или тонкая металлическая сетка.

В отстойных центрифугах со сплошными стенками производят разделение эмульсии и суспензий по принципу отстаивания, причем действие силы тяжести заменяется действием центробежной силы.

В фильтрующих центрифугах с проницаемыми стенками осуществляется процесс разделения суспензий по принципу фильтрования, причем вместо разности давлений используется действие центробежной силы.

По величине фактора разделения центрифуги можно условно разделить на две группы: нормальные центрифуги ( $Fr < 3500$ ) и сверхцентрифуги ( $Fr > 3500$ ).

Нормальные центрифуги применяются главным образом для разделения различных суспензий, за исключением суспензий с очень малой концентрацией твердой фазы, а также для удаления влаги из штучных материалов. Сверхцентрифуги служат для разделения эмульсий и тонкодисперсных суспензий.

Нормальные центрифуги могут быть отстойными и фильтрующими [5]. В процессах очистки сточных вод фильтрующие центрифуги используют для разделения грубодисперсных систем, отстойные – для разделения трудно-фильтрующихся тонко- и грубодисперсных суспензий, а также для классификации суспензий по размерам и плотности частиц. Для очистки производственных сточных вод наиболее перспективны отстойные центрифуги.

Сверхцентрифуги являются аппаратами отстойного типа и подразделяются на трубчатые сверхцентрифуги, используемые для разделения тонкодисперсных суспензий, и жидкостные сепараторы, служащие для разделения эмульсий.

Существенным признаком типа центрифуг является способ выгрузки из них осадка. Выгрузка производится вручную, при помощи ножей



или скребков, шнеков и поршней, движущихся возвратно-поступательно (пульсирующих), а также под действием силы тяжести и центробежной силы.

По расположению оси вращения различают вертикальные, наклонные и горизонтальные центрифуги.

В зависимости от организации процесса центрифуги делятся на периодически и непрерывно действующие.

Важнейшими характеристиками центрифуги являются фактор разделения и продолжительность центрифугирования. Фактор разделения:

$$\Phi_p = \frac{\omega^2 r}{g}, \quad (3.15)$$

где  $\Phi_p$  – угловая скорость вращения, рад/с;

$r$  – радиус вращения, м.

Для выделения из сточных вод тонко- и среднедиспергированных примесей применяют центрифуги с фактором разделения более 2500.

Центрифуги периодического действия целесообразно использовать при концентрации нерастворимых примесей не более 2–3 г/л и если образующиеся осадки цементируются или характеризуются высокими абразивными свойствами. Центрифуги периодического действия применяют для очистки сточных вод, расход которых не превышает 20 м<sup>3</sup>/ч, при необходимости выделения частиц гидравлической крупностью 0,05–0,01 мм/с.

Из центрифуг непрерывного действия в системах очистки вод наибольшее распространение получили горизонтальные шнековые центрифуги ОГШ (рис. 3.5). Их используют для выделения веществ с гидравлической крупностью примерно 0,2 мм/с (противоточные) и 0,05 мм/с (прямоточные). Центрифуги непрерывного действия ОГШ и другие применяют при очистке сточных вод с расходом до 50–100 м<sup>3</sup>/ч.

Необходимый типоразмер осадительной центрифуги подбирают по каталогу. Основной расчетной величиной процесса центрифугирования является гидравлическая крупность выделяемых частиц в поле центробежных сил  $\omega_0$ . Эту величину определяют экспериментально. При расчете определяют  $\Phi_0$ , высоту осветляемого слоя  $h$ , время центрифугирования  $t_{ц}$ , т. е. параметры, от которых зависит необходимая эффективность осветления, а затем по каталогу выбирают типовой размер центрифуги.

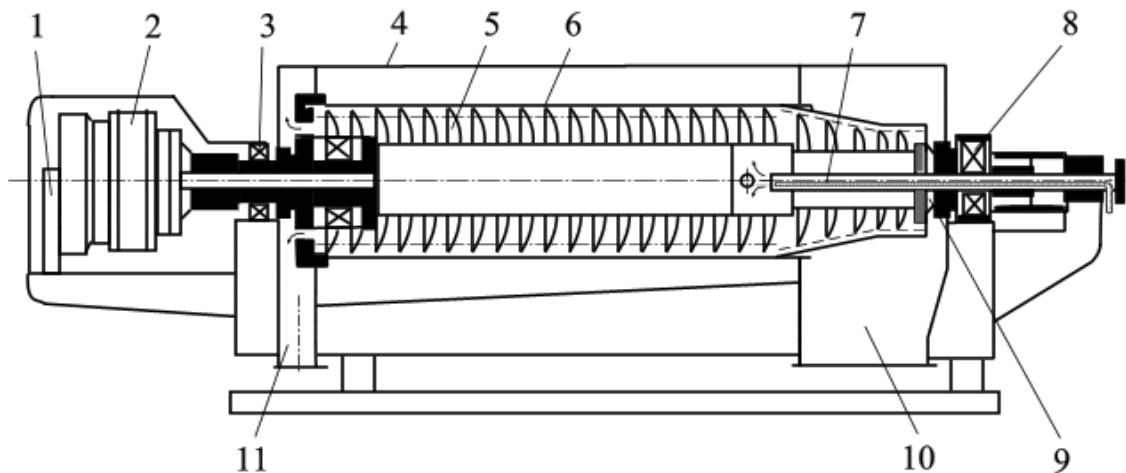


Рис. 3.5. Схема устройства центрифуги шнекового типа:

1 – защитное устройство; 2 – редуктор; 3, 8 – опоры; 4 – кожух; 5 – шнек;  
6 – цилиндроконический ротор; 7 – питающая труба; 9 – выгрузочные окна;  
10 – камера для выгрузки осадка; 11 – камера для отвода фугата

Производительность центрифуги:

$$Q = V_{\text{в}}/t_{\text{ц}}, \quad (3.16)$$

где  $V_{\text{в}}$  – расчетный объем ванны ротора при  $h = D - D_{\text{с}}/2$  ( $D$  – наибольший внутренний диаметр ротора);

$D_{\text{с}}$  – диаметр порогов сливных окон;

$t_{\text{ц}}$  – продолжительность пребывания суспензии в роторе.

Так как объем ванны ротора используется не полностью, фактическая производительность будет меньше  $Q_{\text{ф}} = k \cdot Q$ , где  $k$  – коэффициент использования объема ванны ( $k = 0,4-0,6$ ).

*Жидкостные сепараторы.* К сверхцентрифугам относятся трубчатые аппараты и жидкостные сепараторы. На рис. 3.6 изображена схема трубчатой сверхцентрифуги для разделения суспензий.

Ротор 2 центрифуги имеет диаметр не более 200 мм, высота корпуса 1 центрифуги в 5–7 раз больше диаметра ротора. Верхняя часть ротора жестко соединена с коническим шпинделем 4, который подвешен на опоре 5 и приводится во вращение с помощью шкива 6. Частота вращения ротора достигает  $750 \text{ с}^{-1}$ , что позволяет получить  $K_{\text{р}} > 15\,000$ . Суспензия подается по трубе 9 через эластичный направляющий подпятник 8 в нижнюю часть ротора. Под действием центробежной силы осадок оседает на внутренней поверхности ротора.

Чтобы жидкость не отставала от стенок ротора, внутри установлена длинная крестовина 3. Осветленная жидкость отводится по трубе 7, по истечении определенного времени сверхцентрифуга останавливается и осадок из ротора удаляется. Достоинством трубчатых сверхцентрифуг является высокая интенсивность разделения, компактность и герметичность. К недостаткам можно отнести малый объем ротора и выгрузку осадка вручную.

Для разделения эмульсий применяют сверхцентрифуги с более сложным устройством верхней части ротора, что позволяет отдельно отводить тяжелую и легкую жидкости. Тарельчатые сепараторы непрерывного действия применяются для разделения эмульсий и осветления жидкостей. Барабан центрифуги имеет диаметр 150–300 мм и частоту вращения  $90\text{--}166\text{ с}^{-1}$ .

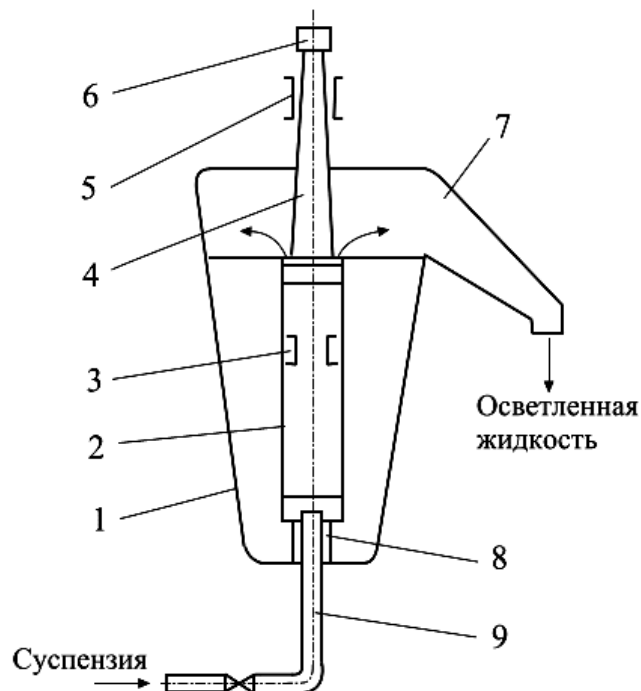


Рис. 3.6. Схема трубчатой сверхцентрифуги для разделения суспензий:  
1 – корпус; 2 – ротор; 3 – крестовина; 4 – шпиндель; 5 – опора; 6 – шкив; 7 – труба для отвода осветленной жидкости; 8 – подпятник; 9 – труба для подачи суспензии

Для центробежного разделения различных жидких отходов широкое распространение получили *жидкостные сепараторы*, работающие по принципу тонкослойного центрифугирования (сепарирования).

Для сгущения активного ила и сырого осадка применяют жидкостные сепараторы с тарельчатыми вставками. При обезвоживании активного ила влажностью 99,4–99,6 % на сепараторах с периодической

и пульсирующей выгрузкой кека влажность ила снижалась до 88,1–91,4 %. При разделении фугата, полученного центрифугированием сырых и сброженных осадков, влажность кека составляла 89,3–92,1 %. На сепараторе активный ил сгущался до 95,6–97,9 %. В таких же пределах получены данные при сепарировании фугата шнековой центрифугой, работавшей на сыром и сброженном осадках.

Схема *тарельчатого сепаратора* приведена на рис. 3.7. В барабане 2 тарельчатого сепаратора находится пакет конических тарелок 3. Эмульсия подается в нижнюю часть барабана через трубу 6 и движется в полостях между тарелками. Тяжелая жидкость отбрасывается к стенкам корпуса и отводится через отверстие 4. Более легкая жидкость собирается у центра барабана и удаляется через кольцевой канал 5. Для того, чтобы жидкость не отставала от стенок барабана, он снабжен ребрами 1.

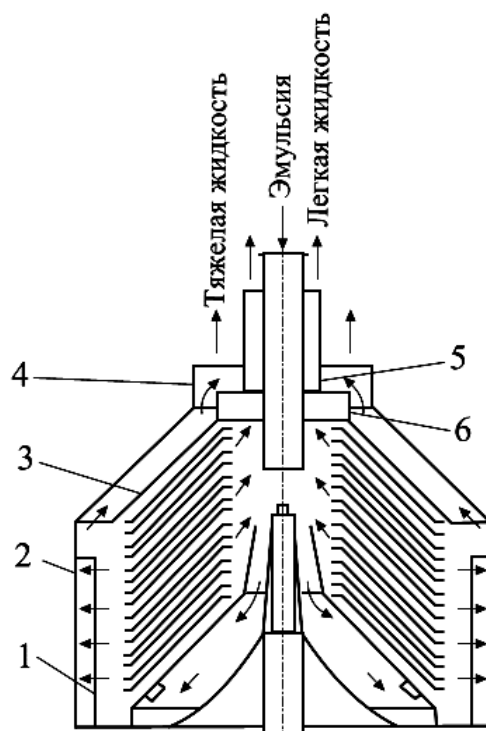


Рис. 3.7. Жидкостной сепаратор тарельчатого типа:

1 – труба для подачи эмульсии; 2 – тарелки; 3 – отверстие для отвода более тяжелой жидкости; 4 – кольцевой канал для отвода более легкой жидкости; 5 – ребра

Достоинством тарельчатых сепараторов является более высокая степень разделения, чем сверхцентрифуг, недостатком – сложность устройства.

Жидкостные сепараторы можно применять в некоторых отраслях промышленности, например для очистки сточных вод, в медицинской промышленности, а также на мясокомбинатах. Принцип действия

жидкостных сепараторов состоит в следующем. На частицы, взвешенные в сепарируемой жидкости, действуют две силы: одна направлена радиально к периферии  $P_{\text{п}}$ , а другая – к центру  $P_{\text{ц}}$ . Равнодействующая этих сил  $P$  осаждает частицы на внутренней поверхности пакета тарелок.

Образующийся кек сдвигается центробежной силой к периферии ротора и сползает в сборники, откуда выгружается непрерывно или периодически осветленная жидкость (фугат) потоком направляется к оси вращения сепаратора и отводится через сливную трубу.

Если центрифугированию подвергается эмульсия, то обе фракции после сепарации непрерывным потоком выводятся из барабана в соответствующие приемные емкости. При разделении суспензии одна фракция, например более легкая дисперсионная среда, выводится из барабана непрерывно, а вторая – дисперсная фаза, состоящая из более тяжелых твердых частиц, накапливается в барабане и разгружается периодически. Непрерывный вывод твердой фазы осуществляется на сопловых сепараторах, в которых твердые частицы выбрасываются из периферии барабана в виде концентрированной суспензии.

Производительность сепараторов  $L$ , л/ч, определяется по формуле:

$$L = 0,04\beta \cdot t \cdot z \cdot \eta \cdot V \cdot n^2, \quad (3.17)$$

где  $\beta$  – коэффициент переполнения рабочего объема барабана сепаратора;  
 $t$  – разделяемость, период, в течение которого расчетная частица твердой фазы выделяется из жидкости, с;

$z$  – число межтарелочных пространств;

$\eta$  – КПД сепаратора;

$V$  – объем межтарелочного пространства, см<sup>3</sup>;

$n$  – частота вращения барабана, мин<sup>-1</sup>.

На рис. 3.8. изображена трехколонная центрифуга. Аппараты этого типа относятся к нормальным отстойным или фильтрующим центрифугам периодического действия с выгрузкой осадка вручную.

В трехколонной фильтрующей центрифуге разделяемая суспензия загружается в перфорированный ротор 1, внутренняя поверхность которого покрыта фильтровальной тканью или металлической сеткой. Ротор при помощи конуса 2 установлен на валу 3, который приводится во вращение электродвигателем посредством клиноременной передачи. Жидкая фаза суспензии проходит сквозь ткань (или сетку) и отверстия в стенке ротора и собирается в дне 4 станины, покрытом неподвижным

кожухом 5, откуда отводится для дальнейшей обработки. Осадок, образовавшийся на стенках ротора, извлекается при помощи лопатки, после открывания крышки кожуха 6.

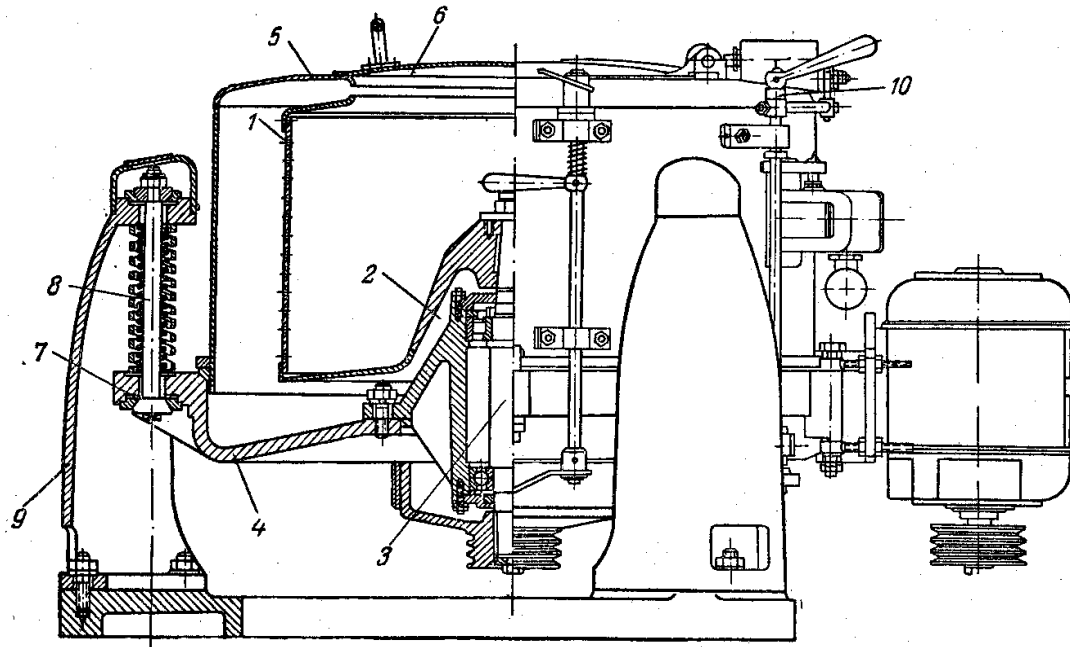


Рис. 3.8. Трехколонная центрифуга:

- 1 – перфорированный ротор; 2 – опорный конус; 3 – вал; 4 – дно станины;  
5 – неподвижный кожух; 6 – крышка кожуха; 7 – станина; 8 – тяга; 9 – колонка;  
10 – ручной тормоз

Для смягчения воздействия вибраций на фундамент станина 7 с укрепленным на ней ротором, приводом и кожухом подвешена при помощи вертикальных тяг 8 с шаровыми головками на трех расположенных под углом  $120^\circ$  колонках 9. Это обеспечивает некоторую свободу при вибрации ротора. Центрифуга снабжена тормозом, который может быть приведен в действие только после остановки электродвигателя.

Такие центрифуги отличаются небольшой высотой и хорошей устойчивостью и получили распространение для проведения длительного центрифугирования.

На рис. 3.9. изображена центрифуга с пульсирующим поршнем для выгрузки осадка. Эти аппараты относятся к фильтрующим центрифугам непрерывного действия с горизонтальным ротором.

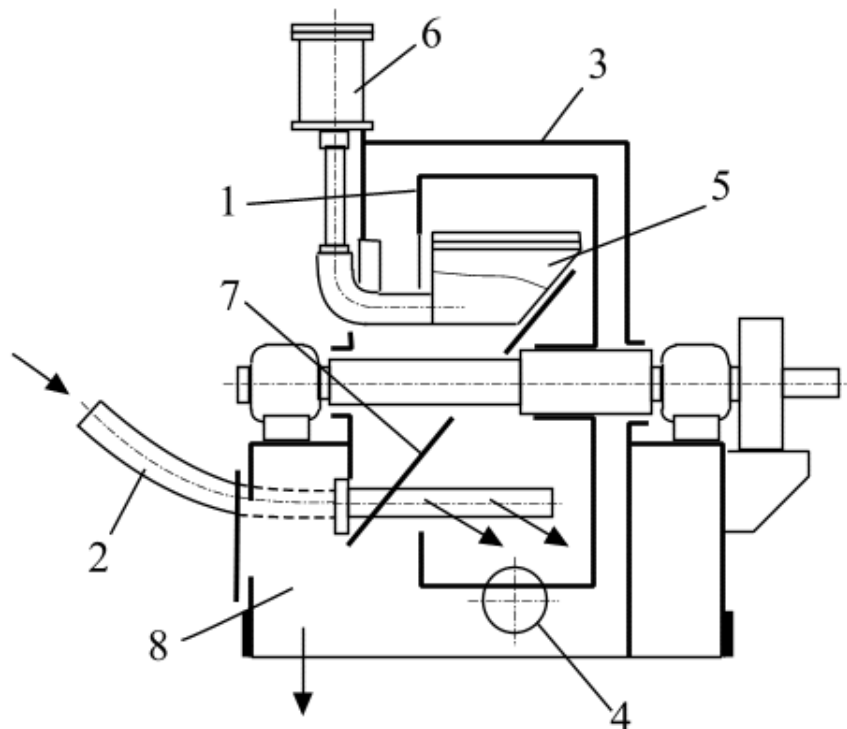


Рис. 3.9. Горизонтальная центрифуга с ножевым устройством для удаления осадка:

- 1 – перфорированный ротор; 2 – труба для подачи суспензии; 3 – кожух;  
 4 – штуцер для удаления фугата; 5 – нож; 6 – гидравлический цилиндр для объема ножа;  
 7 – наклонный желоб; 8 – канал для удаления осадка

Суспензия по трубе 1 поступает в узкую часть конической воронки 2, вращающейся с такую же скоростью, как и перфорированный ротор 3, покрытый изнутри металлическим щелевым ситом 4. Суспензия перемещается по внутренней поверхности воронки и постепенно приобретает скорость, почти равную скорости вращения ротора. Затем суспензия отбрасывается через отверстия в воронке на внутреннюю поверхность сита в зоне перед поршнем 5. Под действием центробежной силы жидкая фаза проходит сквозь щели сита и удаляется из кожуха центрифуги по штуцеру 6. Твердая фаза задерживается на сите в виде осадка, который периодически перемещается к краю ротора при движении поршня вправо приблизительно на  $1/10$  длины ротора. Таким образом, за каждый ход поршня из ротора удаляется количество осадка, соответствующее длине хода поршня; при этом поршень совершает 10–16 ходов 1 мин. Осадок удаляется из кожуха через канал 7.

Поршень укреплен на штоке 8, находящемся внутри полого вала 9, который соединен с электродвигателем и сообщает ротору вращательное движение. Полый вал с ротором и шток с поршнем и конической воронкой

вращаются с одинаковой скоростью. На другом конце штока насажен перпендикулярно его оси диск 10, на противоположные поверхности которого в особом устройстве попеременно воздействует давление масла, создаваемое шестеренчатым насосом.

Такие центрифуги применяют для обработки грубодисперсных, легкоразделяемых суспензий, особенно в тех случаях, когда суспензия попадает на щелевое сито непосредственно после смещения с него осадка поршнем, а также значительный расход энергии поршнем. К недостаткам их относятся увлечение твердых частиц фугатом в тот момент, когда суспензия попадает на щелевое сито непосредственно после смещения с него осадка поршнем. А также значительный расход энергии.

### 3.3. Расчет центрифуг

Центробежная сила  $C$  (в Н), развиваемая при центрифугировании, определяется по уравнению:

$$C = Mn^2/R = M\omega^2 R \approx 40Mn^2 R \approx 20Mn^2 D, \quad (3.18)$$

где  $M$  – масса осадка и жидкости, находящейся в барабане центрифуги, кг;  $\omega$  – угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;  $D = 2R$  – диаметр барабана, м;  $n$  – частота вращения центрифуги,  $\text{с}^{-1}$ .

Давление фильтрования (в Па) при центрифугировании приближенно

$$\Delta p_{\text{ц}} = C/F, \quad (3.19)$$

где  $C$  – центробежная сила, рассчитываемая по уравнению (10.1);  $F = \pi D Y H$  – средняя поверхность фильтрования,  $\text{м}^2$ ;  $D$  – внутренний диаметр барабана центрифуги, м;  $H$  – высота барабана (в центрифугах периодического и полунепрерывного действия) или зона фильтрования (в центрифугах непрерывного действия), м; более точно

$$\Delta p_{\text{ц}} = 20\rho_{\text{с}} n^2 (R_2^2 - R_1^2) = 5\rho_{\text{с}} n^2 (D_2^2 - D_1^2), \quad (3.20)$$

где  $\rho_{\text{с}}$  – плотность суспензии,  $\text{кг/м}^3$ ;  $D_1 = 2R_1$  – диаметр внутреннего слоя жидкости, м;  $D_2 = 2R_2$  – внутренний диаметр барабана, м;  $n$  – частота вращения центрифуги,  $\text{с}^{-1}$ .



Фактором разделения в центрифугах называется отношение ускорения центробежной силы к ускорению силы тяжести:

$$f = C/P = \omega^2 R/g \approx 20Fr_{\text{ц}}. \quad (3.21)$$

где  $R$  – радиус барабана, м;  $\omega$  – угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;  $Fr_{\text{ц}} = Dn^2/g$  – центробежный критерий Фруда.

Скорость фильтрации при центрифугировании может быть выражена в форме общего гидравлического закона:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{\Delta p_{\text{ц}}}{R_{\text{ц}}}, \quad (3.22)$$

где  $\Delta p_{\text{ц}}$  – перепад давлений при центрифугировании;  $R_{\text{ц}} = R_{\text{ос}} + R_{\text{тк}}$  – общее сопротивление при центрифугировании, равное сумме сопротивлений осадка и фильтрующей перегородки. Величины  $R_{\text{ос}}$ ,  $R_{\text{тк}}$  могут быть рассчитаны по уравнениям фильтрации или определены экспериментальным путем.

Глубина воронки  $h$  (в м) жидкости, образуемой при вращении барабана центрифуги, рассчитывается ориентировочно по формуле:

$$h = 2n^2 R^2, \quad (3.23)$$

где  $n$  – частота вращения барабана,  $\text{с}^{-1}$ ;  $R$  – радиус барабана, м.

Расход мощности в пусковой период для центрифуг периодического действия вычисляется по следующим формулам.

а) Мощность, расходуемая на преодоление инерции барабана и загрузки.

Работа  $T_1$  (в Дж), затрачиваемая на преодоление инерции барабана в пусковой период:

$$T_1 = w_2^2 M_{\text{б}} / 2, \quad (3.24)$$

где  $w_2$  – установившаяся по достижении заданной частоты вращения окружная скорость вращения барабана (на внешней поверхности его с радиусом  $R_2$ ), м/с;  $M_{\text{б}}$  – масса барабана, кг.

Работа  $T_2$  (в Дж), затрачиваемая на преодоление инерции загрузки в пусковой период (объем загруженного материала принят равным половине полного объема барабана):

$$T_2 = 0,75w_1^2\rho V/4, \quad (3.25)$$

где  $w_1$  – окружная скорость вращения на внутреннем радиусе барабана  $R_1$ , м/с;  $\rho$  – плотность загруженного материала, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – полный объем барабана центрифуги, равный  $\pi R_1^2 H$ , м<sup>3</sup>.

Мощность  $N_1$  (в Вт), расходуемая на преодоление инерции барабана и загрузки во время пускового периода:

$$N_1 = (T_1 + T_2)/\tau, \quad (3.26)$$

где  $\tau$  – продолжительность пускового периода, с.

По практическим данным  $\tau$  обычно составляет 1–3 мин.

б) Мощность  $N_2$  (в Вт), расходуемая на трение вала в подшипниках:

$$N_2 = \lambda M w_B g, \quad (3.27)$$

где  $\lambda$  – коэффициент трения, равный 0,07–0,1;  $M$  – масса всех вращающихся частей центрифуги вместе с загрузкой, кг;  $w_B$  – окружная скорость вращения цапфы вала, м/с.

в) Мощность  $N_3$  (в Вт), расходуемая на трение стенки барабан о воздух:

$$N_3 = 2,94 \cdot 10^{-3} \beta R_2^2 w_2^3 \rho_B, \quad (3.28)$$

где  $\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент сопротивления, равный в среднем 2,3.

г) Полный расход мощности  $N_T$  (в Вт) для центрифуги периодического действия в пусковой период:

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3. \quad (3.29)$$

С учетом к.п.д. передаточного устройства  $\eta_{\Pi}$  расходуемая мощность:

$$N = N_T / \eta_{\Pi}. \quad (3.30)$$

Расчет толщины стенки барабана центрифуги или проверка стенки на прочность могут быть сделаны по уравнению:

$$K_z = \frac{C_1 + C_2}{2f}, \quad (3.31)$$

где  $K_z$  – допускаемое напряжение материала стенки барабана на разрыв, Па;  $f$  – площадь сечения стенки барабан, м<sup>2</sup>;  $C_1$  – центробежная сила полукольца стенки барабан, Н;  $C_2$  – центробежная сила полукольца загрузки, Н.

Величины  $C_1$  и  $C_2$  рассчитываются по уравнению (3.18). При этом расстояние  $R$  (в м) от центра тяжести вращающегося полукольца до оси вращения определяется по формуле:

$$R = \frac{4}{3\pi} \left( \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2} \right), \quad (3.32)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – внутренний и наружный радиусы полукольца, м.

Производительность  $V$  (объемный расход поступающей суспензии) отстойной центрифуги с ножевым съемом осадка типа АОГ (в м<sup>3</sup>/с) при ламинарном режиме осаждения определяется по уравнению:

$$V = F' w \eta, \quad (3.33)$$

где  $F' = 2\pi R_0 L$  – поверхность зеркала суспензии в барабане, м<sup>2</sup>;  $R_0$  – внутренний радиус кольцевого слоя суспензии, м;  $L$  – длина барабана, м;  $w = w_{oc} f$  – скорость осаждения частиц под действием центробежной силы, м/с;  $w_{oc}$  – скорость осаждения частиц под действием силы тяжести, м/с;  $f$  – фактор разделения, определяемый по радиусу  $R_0$ ;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий отношение действительной и теоретической производительности центрифуги, который при отсутствии опытных данных можно принимать равным 0,4–0,5; он зависит от скольжения жидкости относительно барабана, а также учитывает наличие вихрей, затрудняющих осаждение.

Формула (3.33) может быть приведена к удобному для расчетов виду:

$$V_{\text{ч}} = 25,3\eta L n^2 R_0^2 w_{\text{ос}} k, \quad (3.34)$$

где  $k$  – отношение времени подачи суспензии (время собственно центрифугирования) к общему времени работы центрифуги.

б) Производительность  $V$  (в м<sup>3</sup>/ч) по суспензии центрифуги НОГШ (непрерывнодействующей отстойной горизонтальной со шнековой выгрузкой осадка) определяется по уравнению:

$$V = 3,5 \left[ D_{\text{сл}}^2 L_{\text{сл}} (\rho - \rho_c) d^2 n^2 \right] / \mu, \quad (3.35)$$

где  $D_{\text{сл}}$  и  $L_{\text{сл}}$  – диаметр и длина «сливного цилиндра», м;  $\rho$  и  $\rho_c$  – плотность частиц и среды, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – крупность разделения (диаметр наименьших осаждаемых частиц), м;  $n$  – частота вращения ротора, об/мин;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости среды, Па·с.

Производительность  $V$  (в м<sup>3</sup>/с) трубчатой сверхцентрифуги (по питанию) определяется из следующего выражения:

$$V \leq w V_{\text{ж}} / h, \quad (3.36)$$

где  $w$  – скорость осаждения частиц в центробежном поле, м/с;  $V_{\text{ж}} = 0,785 (D^2 - D_0^2) L$  – объем жидкости в барабане, м<sup>3</sup>;  $h$  – глубина потока в барабане, м;  $L$  – длина рабочей части барабана, м;  $D$  – внутренний диаметр барабана, м;  $D_0$  – диаметр сливного порога, м.

Условием хорошей работы сверхцентрифуги расчетного диаметра является наличие ламинарного режима движения потока в барабане.

### 3.4. Примеры решения задач

**Пример 3.1.** Центрифуга периодического действия имеет барабан с внутренним диаметром 1200 мм, высотой 550 мм, толщиной стенок 10 мм и массой 120 кг. Число отверстий в стенке барабана по вертикали 12, диаметр отверстий 5 мм. На барабан надеты три стальных обруча сечением 15×30 мм<sup>2</sup> каждый. Материал барабана – сталь с временным сопротивлением на разрыв 4500 кгс/см<sup>2</sup>, масса загрузки 400 кг, толщина слоя 200 мм.

Найдите предельно допустимую частоту центрифуги, если запас прочности не должен быть менее 5.

**Решение.** Для данной стали допускаемое напряжение на разрыв:

$$K_z = 4500 \cdot 9,81 \cdot 10^4 / 5 = 8,83 \cdot 10^7 \text{ Па, или } 900 \text{ кгс/см}^2.$$

Площадь сечения стенки барабана и обручей за вычетом отверстий:

$$f = 55 \cdot 1 - 12 \cdot 1 \cdot 0,5 + 3 \cdot 3 \cdot 1,5 = 62,5 \text{ см}^2 = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Из формулы (10.17) следует, что максимально допустимая центробежная сила:

$$C_1 + C_2 = 8,83 \cdot 10^7 \cdot 2 \cdot 6,25 \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м}^2.$$

Расстояние от центра тяжести полукольца стенки барабана до оси вращения находим по формуле (3.32):

$$R_6 = \frac{3}{3 \cdot 3,14} \left( \frac{0,61^3 - 0,6^3}{0,61^2 - 0,6^2} \right) = 0,387 \text{ м.}$$

Центробежная сила, развиваемая половиной барабана, согласно уравнению (3.18):

$$C_1 = 0,011 \cdot 60 \cdot 0,387 \cdot n^2 = 0,253 n^2 \text{ Н.}$$

Расстояние от центра тяжести полукольца загрузки до оси вращения:

$$R_3 = \frac{3}{3 \cdot 3,14} \left( \frac{0,6^3 - 0,4^3}{0,6^2 - 0,4^2} \right) = 0,32 \text{ м.}$$

Центробежная сила, развиваемая полукольцами загрузки:

$$C_2 = 0,011 \cdot 200 \cdot 0,32 \cdot n^2 = 0,697 n^2 \text{ Н.}$$

Общая центробежная сила:

$$C_1 + C_2 = 0,253 n^2 + 0,697 n^2 = 0,950 n^2 \text{ Н.}$$

Выше было найдено, что центробежная сила не должна превышать  $1,1 \cdot 10^6$  Н. Следовательно, максимально допустимая частота вращения центрифуги:

$$n = \sqrt{1,1 \cdot 10^6 / 0,950} = 1070 \text{ об/мин} = 17,8 \text{ с.}$$

**Пример 3.2.** Определите часовую производительность (по питанию) автоматической осадительной центрифуги АОГ-800 при работе ее на водной суспензии гидроксида магния. Плотность частиц  $\rho = 2525 \text{ кг/м}^3$ , температура суспензии  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Наименьший диаметр частиц  $3 \text{ мкм}$ . Характеристика центрифуги: диаметр барабана  $800 \text{ мм}$ ; длина барабана  $400 \text{ мм}$ ; диаметр борта  $570 \text{ мм}$ ; частота вращения  $1200 \text{ об/мин}$ . Цикл работы центрифуги составляет  $20 \text{ мин}$ ; из них  $18 \text{ мин}$  – подача суспензии,  $2 \text{ мин}$  – разгрузка осадка.

**Решение.** Производительность определяем по формуле (3.34):

$$V_{\text{ч}} = 25,3 \eta L n^2 R_0^2 w_{\text{ос}} k.$$

Скорость осаждения частиц находим по формуле Стокса:

$$w_{\text{ос}} = \frac{d^2 (\rho - \rho_c) g}{18 \mu_c} = \frac{3^2 (2525 - 1000) 9,81}{10^{12} \cdot 18 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 0,935 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.}$$

Динамический коэффициент вязкости воды при  $30 \text{ }^\circ\text{C}$   $\mu_c = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Определяем скорость осаждения под действием центробежной силы:

$$w = w_{\text{ос}} \frac{R_0 n^2}{900} = 0,935 \cdot 10^{-5} \frac{0,285 \cdot 1200^2}{900} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Проверяем режим осаждения:

$$\text{Re} = \frac{w d \rho_c}{\mu_c} = \frac{4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 1,6 \cdot 10^{-2},$$

т. е. режим ламинарный.

Далее находим:

$$k = 18/20 = 0,9.$$

Производительность центрифуги, принимая  $\eta = 0,45$ :

$$V_{\text{ч}} = 25,3 \cdot 0,45 \cdot 0,4 \cdot 1200^2 \cdot 0,285^2 \cdot 0,935 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9 = 4,46 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется центрифугированием?
2. Запишите уравнение для расчета центробежной силы.
3. Что такое сепарация?
4. Назовите стадии работы процесса центрифугирования в отстойных барабанах.
5. Какие стадии включает центробежное фильтрование?
6. На какие виды подразделяются центрифуги по способу выгрузки?
7. На какие группы подразделяются центрифуги по величине фактора разделения?
8. На какие типы подразделяются центрифуги относительно расположения оси вращения?
9. Запишите формулу для центробежной силы, развиваемой при центрифугировании.
10. Что называют Фактором разделения?
11. По каким формулам вычисляется мощность для центрифуг периодического действия.
12. Поясните принцип действия циклона.
13. Основные параметры, характеризующие работу циклона.

## ГЛАВА 4

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД

К физико-химическим методам очистки относятся коагуляция, флокуляция, сорбция, флотация, экстракция, диализ, выпаривание, испарение и т.д. Кроме этого, к этим методам относят методы, связанные с наложением электрического поля, – электрокоагуляция, электрофлотация, электролиз и т.д. В настоящей главе рассматриваются два метода, наиболее широко используемые в процессах очистки воды – флотация и коагуляция.

#### 4.1. Флотация

##### 4.1.1. Виды флотации

*Флотацией* называют процесс всплывания в жидкой среде частиц дисперсной фазы с прилипшими к ним пузырькам газа [14]. Для практических целей этот процесс был впервые применен в 1877 г. при обогащении графитовых руд. Однако вспомнили о нем только в 1898г., в связи с внедрением изобретения Эльмора. В 1901 г. флотацию впервые применили для обогащения руд в больших промышленных масштабах.

В настоящее время флотационный способ широко используют для обогащения и разделения руд различных металлов, твердого топлива и неметаллических полезных ископаемых. Кроме того, флотацию применяют для выделения взвешенных частиц из водных растворов, а также для очистки сточных вод.

Наибольшее распространение процессы флотации получили при обогащении полезных ископаемых. Здесь они наиболее полно изучены экспериментально и теоретически. Перед флотационным обогащением руду измельчают. Полученный порошок смешивают с водой, в результате чего образуется неоднородная система, называемая пульпой. В пульпу вводят флотационные реагенты: собиратели, регуляторы и пенообразователи. Собиратели придают твердым частицам способность прилипать к пузырькам газа. Регуляторы обеспечивают избирательность. Они усиливают прочность прилипания пузырьков или, наоборот, подавляют эту способность у определенного вида частиц. Пенообразователи повышают дисперсность газовых пузырьков и устойчивость пены.



Поверхность частиц ценных минералов и частиц породы имеет разные физико-химические свойства. После воздействия на пульпу реагентов это различие проявляется в способности одних частиц хорошо смачиваться водой, а других прилипать к пузырькам газа. Если затем вводить в пульпу тем или иным способом пузырьки воздуха, то частицы руды будут увлекаться ими вверх на поверхность в виде пены, которую направляют в специальные отстойники. Когда при обогащении полезных ископаемых флотировать частицы ценного минерала, а частицы пустой породы остаются в пульпе (камерный продукт), то в этом случае процесс обогащения называют прямой флотацией. Если, наоборот, в пенный продукт переходит пустая порода, а ценный минерал остается в пульпе, то такой процесс обогащения полезных ископаемых называют обратной флотацией.

Различают *пенную, пленочную, масляную* и другие виды флотации. Наибольшее распространение в промышленности получила пенная флотация. Необходимыми условиями пенной флотации являются способность твердой частицы прилипать к пузырьку газа в воде, и способность пульпы образовывать устойчивую пену. Стабильность и продолжительность существования пены снижается с увеличением размера пузырьков и с ростом температуры пульпы. В свою очередь, размеры пузырьков зависят от поверхностного натяжения жидкости на границе с газообразной фазой. Образованию устойчивой пены, кроме понижения поверхностного натяжения, благоприятствует также увеличение вязкости жидкости. Изменение вязкости не оказывает влияния на дисперсность пузырьков. Так, например, изменение вязкости даже в 100 раз не оказывает существенного влияния на размер пузырьков.

*Пленочная флотация* была предложена в 1892 г., но до сих пор не нашла широкого применения. Сущность ее заключается в том, что измельченную руду обрабатывают реагентами и насыпают с небольшой высоты на поверхность воды. Не смачиваемые частицы остаются на поверхности воды, а остальные переходят в жидкую фазу и оседают вниз.

*Масляная флотация* представляет собой процесс всплывания агрегатов частиц, включенных в масляные оболочки. С этой целью измельченную руду смешивают с водой, в которой находится диспергированное жидкое масло. Необходимым условием обогащения полезных ископаемых с помощью масляной флотации является избирательное смачивание минеральных частиц жидким маслом.

Одним из вариантов флотационного метода разделения неоднородных систем является *ионная флотация*. Возможность флотации ионов и молекул из растворов с помощью пузырьков газа известна сравнительно давно. Однако этот способ приобрел важное значение только

после того, как для его осуществления было предложено использовать флотационные, реагенты. Как правило, для ионной флотации применяют собиратели, которые представляют собой высоко поверхностно-активные вещества. Собиратель электростатически притягивает ионы к поверхности пузырька или же связывает их в координационное или любое другое поверхностно-активное соединение.

Достоинством ионной флотации является высокая степень селективности. Так, при соответствующих условиях представляется возможным разделить ионы различных элементов, имеющие одинаковые по величине и знаку заряды. Для ионной флотации характерно образование тонкого слоя неустойчивой пены, стабилизированной малорастворимыми адсорбцион-ными слоями. Такая пена разрушается в разделительном аппарате, превращаясь в так называемую пенку – плохо растворимый гидрофобный продукт, в котором концентрируется извлекаемое из раствора вещество.

Ионная флотация находит применение при очистке сточных вод и для извлечения металлов из разбавленных растворов. Перспективным направлением является также использование ионной флотации для извлечения из морской воды растворенных в ней ценных веществ. Как выяснилось, флотационные методы извлечения ионов и молекул из растворов наиболее перспективны при низкой концентрации вещества, меньше  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  моль/л.

Большой интерес в силу своей универсальности, высокой производительности и эффективности представляет метод флотации при очистке сточных вод промышленных предприятий [14]. Долгое время флотация, как метод очистки сточных вод от нерастворимых загрязнений, не находила широкого распространения. В прошлом этот метод успешно использовался в бумажной промышленности. Позднее его стали применять в основном на нефтепромысловых и нефтеперерабатывающих предприятиях и там, где сточные воды содержат отходы нефти, смолы и продукты ее переработки. В последнее время интерес к практическому использованию флотации сильно возрос. Исследована и доказана возможность очистки флотацией сточных вод целого ряда предприятий, таких как заводы искусственного волокна, кожевенные, механические, пищевые комбинаты, а также предприятий энергетического комплекса и др.

При незначительном времени пребывания сточных вод во флотационных установках (20–40 минут) обеспечивается высокий эффект очистки от нерастворимых примесей и взвешенных веществ. Это предопределило перспективность метода и возможность его

использования для очистки сточных вод как промышленных, так и бытовых. Очистка флотацией сточных вод сопровождается одновременно такими явлениями, как аэрация, снижение концентрации поверхностно-активных веществ, бактерий и микроорганизмов, что способствует дальнейшей очистке сточных вод, улучшает их общее санитарное состояние, а иногда может иметь самостоятельное значение и явиться решающим фактором при выборе метода водоочистки.

#### 4.1.2. Количественная теория флотации

В связи с недостатками физико-химических основ и кинетических моделей, а также исследованиями роли неравновесных электроповерхностных сил в элементарном акте флотации мелких частиц, начала сформировываться кинетическая теория флотации. В настоящее время она получила достаточно широкое распространение в литературе [14].

Свойства поверхности раздела воздух – вода определяются значением ее удельной свободной поверхностной энергии  $\sigma_{г-ж}$  и структурой поверхностного слоя молекул воды на границе раздела газ – жидкость. Наличие свободной поверхностной энергии на границе раздела воздух – вода и стремление системы в соответствии со вторым законом термодинамики к минимальным значениям приводят к сокращению поверхности пузырька, до тех пор пока капиллярное давление воздуха или газа в нем не приведет к равновесию системы.

Молекулы поверхностного слоя находятся в особом энергетическом состоянии. Свойства жидкости, находящейся в пограничном слое, отличаются от свойств жидкости в объеме. Пограничные слои воды (гидратные слои) имеют повышенную вязкость и пониженную растворяющую способность, скорость диффузии растворенных в них веществ меньше.

Структуру гидратного слоя, обеспечивающую минимальное значение свободной энергии системы полярная жидкость (вода) – аполярное вещество (воздух), можно представить в виде слоя молекул воды на пузырьке, соприкасающихся противоположными по знаку концами диполей, что приводит к взаимной компенсации их дипольных моментов и резкому ослаблению взаимодействия с молекулами воды в объеме. В результате этого толщина гидратного слоя минимальна.

Свойства поверхности раздела частица–вода зависят от кристаллохимического строения частицы. Взаимодействие воды и присутствующих в ней ионов с частицами может изменить электрическое состояние

поверхности. Наиболее важным результатом взаимодействия является образование на поверхности раздела частица – жидкая фаза двойного электрического слоя. Энергия взаимодействия воды с различными ионами частицы не одинакова. Ввиду этого ионы одного знака переходят в раствор в большем количестве, чем ионы другого знака, и энергетическая нейтральность поверхности нарушается. В результате поверхность частицы приобретает заряд, противоположный по знаку тем ионам, которые переходят в раствор. Возникновение заряда на поверхности частицы и образование двойного электрического слоя может происходить и в результате преимущественной адсорбции частицей из раствора ионов одного знака по сравнению с ионами другого знака.

Увеличение электрического заряда поверхности затрудняет переход ионов противоположного знака в раствор из кристаллической решетки частицы. В конце концов, устанавливается состояние равновесия между раствором и твердой поверхностью, которая будет окружена двойным электрическим слоем.

При элементарном акте флотации возможны следующие случаи столкновения частиц и пузырьков, когда:

- когда размер пузырьков больше размера частиц;
- размер частиц больше размера пузырьков;
- размеры пузырьков и частиц сопоставимы.

Различие состоит в том, что в первом варианте происходит осаждение частиц на пузырьке, а во втором мелкие пузырьки закрепляются на крупной частице.

Первый случай проанализирован в многочисленных публикациях и обобщен в [14]. Второй случай рассмотрен гораздо уже, хотя флотация крупных частиц мелкими пузырьками может широко использоваться в водоочистке, особенно при близких значениях плотностей взвесей и жидкости.

В литературе выделены три основных механизма столкновения частицы с пузырьком: седиментационный, градиентный и инерционный.

*а) Седиментационный механизм*

Несмотря на хаотичность движения, обусловленную турбулентными пульсациями жидкости, пузырьки и частицы постоянно находятся в движении вследствие действующих на них сил тяжести. В этом случае:

$$K_g = \frac{3E_g \varphi V_g (D)}{2D}, \quad (4.1)$$

где  $K_g$  – интенсивность процесса по седиментационному механизму,  
 $\varphi$  – объемная концентрация пузырьков;  
 $V_g(D)$  – скорость их седиментации;  
 $E_g$  – эффективность захвата частиц всплывающим пузырьком газа при флотации;

$D$  – диаметр пузырька газа. Индекс  $g$  означает, что сближение частиц и пузырьков осуществляется за счет седиментации.

*б) Градиентный механизм*

Даже если бы частицы и пузырьки имели тот же удельный вес, что и жидкость, и осаждение по седиментационному механизму было бы невозможно, то они все равно испытывали бы столкновения вследствие неоднородности гидродинамического поля. В этом случае:

$$K_G = \frac{\alpha G_\lambda}{\pi} \left(1 + \frac{d}{D}\right)^3, \quad (4.2)$$

где  $K_G$  – интенсивность процесса по градиентному механизму;  
 $\alpha$  – эффективность столкновения частицы и пузырька в поле простого сдвига;  
 $G_\lambda$  – градиент скорости жидкости в пульсациях масштаба;  
 $\lambda, d$  – диаметр частицы.

*в) Инерционный механизм*

Так как вследствие турбулентных пульсаций скорость любого элемента жидкости постоянно меняется как по величине, так и по направлению, то перемещение пузырьков относительно жидкости может происходить за счет инерционных сил. Величина, направление и скорость инерционного смещения в общем случае определяется разницей плотностей частицы (пузырька) и жидкости и размерами частицы (пузырька), а так же как у пузырька и частицы эти параметры отличаются между собой, то это порождает еще один возможный механизм их столкновения.

$$K_W = \frac{3E_W \varphi V_W(D)}{2D}, \quad (4.3)$$

где  $K_W$  – интенсивность процесса по инерционному механизму;  
 $E_W$  – соответствует эффективности захвата частиц пузырьком при инерционном механизме их сближения.

В силу независимости указанных выше механизмов полная интенсивность процесса осаждения частиц на пузырьки может быть вычислена по формуле:

$$K = K_g + K_G + K_W. \quad (4.4)$$

В соответствии с количественной теорией флотации, элементарный акт флотации целесообразно рассматривать как многостадийный процесс. Вероятность элементарного акта часто представляют как произведение трех вероятностей, характеризующих процессы транспорта частиц к поверхности пузырька, закрепления на ней и возможного последующего отрыва.

Процесс сближения частицы с поверхностью пузырька претерпевает качественные изменения при переходе от больших, по сравнению с размером частицы расстояний между их поверхностями, к малым [15].

На больших расстояниях этот процесс определяется действием двух факторов – инерционных сил и сил гидродинамического взаимодействия. Достаточно крупная частица под действием инерционных сил движется почти прямолинейно вплоть до столкновения с поверхностью пузырька, которое осуществляется, если  $b < R + r$ , где  $b$  – радиус трубки тока, набегающего на пузырек потока жидкости. Поток жидкости обтекает поверхность пузырька, линии тока жидкости искривляются, и в это движение жидкости вовлекается частица. Чем меньше размер частицы и отличие ее плотности от плотности среды, тем меньше действующие на нее силы инерции и тем в большей степени ее траектория совпадает с линией тока жидкости (рис. 4.1).

Таким образом, возмущение, которое вносит пузырек в поток жидкости, существенно влияет на движение только очень мелких безинерционных частиц и практически не влияет на движение тяжелых сильно инерционных.

Отклонение траектории малых частиц от прямолинейного пути к поверхности пузырька на расстояниях порядка размера пузырька обусловлено гидродинамическим взаимодействием, которое принято называть дальним [14]. В случае крупных частиц инерционные силы значительно превышают силы дальнего гидродинамического взаимодействия (ДГВ). В случае малых частиц инерционные силы малы по сравнению с ДГВ.

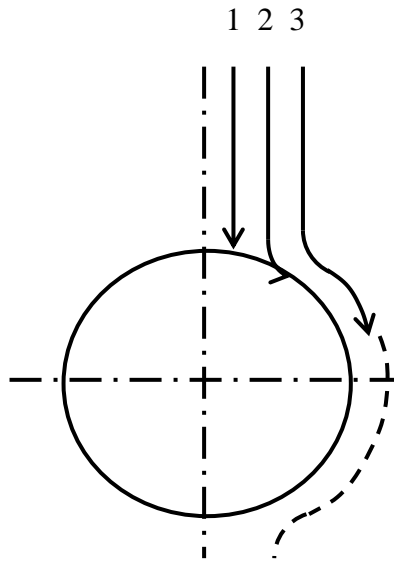


Рис. 4.1. Траектории движения частиц вблизи пузырька газа:  
1 – инерционная; 2 – слабо инерционная; 3 – безинерционная частица

Если выполняется условие:

$$St = \frac{2Ur^2\Delta\rho}{9R\mu} \ll 1, \quad (4.5)$$

где  $St$  – критерий Стокса;

$U$  – скорость всплывания пузырька;

$\Delta\rho$  – разность плотностей частицы и среды;

$\mu$  – динамическая вязкость среды, то такая частица на достаточном удалении от пузырька будет двигаться по линии тока жидкости.

Когда левая часть условия (4.5) не намного меньше единицы, начинают проявляться инерционные эффекты, приводящие к слабому отклонению траектории частицы от линии тока. При обращении неравенства (4.4) силы инерции радикально меняют ситуацию, частица движется почти прямолинейно до столкновения с поверхностью пузырька (рис. 4.1).

Наряду с дальним гидродинамическим взаимодействием существует гидродинамическое взаимодействие на расстояниях порядка радиуса частицы. Последнее приводит к отклонению траекторий частиц от соответствующих линий тока жидкости. Это взаимодействие принято называть ближним гидродинамическим взаимодействием (БГВ). На основе решения гидродинамической задачи о выдавливании жидкости из зазора при приближении сферической частицы к плоской поверхности

(решение Тейлора), в работе [1] показано, что БГВ может воспрепятствовать соприкосновению частиц с пузырьком. Согласно Тейлору, при толщине зазора  $h \ll r$  гидродинамическое сопротивление пленки процессу утончения равно:

$$F = vr/h, \quad (4.6)$$

где  $v$  – скорость сближения частиц с некоторым участком поверхности пузырька, который можно условно рассматривать как плоский.

Если на частицу будет действовать постоянная прижимающая сила  $f$ , то согласно выражению (4.6) имеем:

$$V = fh/r, \quad (4.7)$$

то есть чем тоньше пленка, тем меньше скорость ее утончения. Отсюда следует, что для полного удаления жидкости из зазора требуется бесконечно большое время:

$$t = \int_h^0 \frac{dh}{v(h)} = \int_h^0 \frac{dh}{fh} = \frac{1}{f} \ln \frac{0}{h} \rightarrow \infty. \quad (4.8)$$

В связи с этим возникает вопрос о природе сил, прижимающих частицу к поверхности пузырька и обеспечивающих утончение пленки в течение малого времени. Этот вопрос снимается, если учесть действие поверхностных сил притяжения, возрастающих с уменьшением расстояния быстрее, чем вязкое сопротивление пленки. Утончение пленки при толщине больше эффективного радиуса действия поверхностных сил осуществляется под действием прижимной гидростатической силы.

Таким образом, утончение межфазной пленки в случае крупных частиц осуществляется в процессе инерционного удара, а в случае малых частиц – под действием прижимной гидростатической силы.

Процесс сближения частиц с поверхностью пузырька можно описать количественно, учитывая как дальнее, так и ближнее гидродинамическое взаимодействие, на основе представления об эффективности их столкновения:

$$E = \frac{b_{кр}^2}{R^2}, \quad (4.9)$$

где  $b_{кр}$  – максимальный радиус трубки тока, набегающего на пузырек потока жидкости, все частицы из которой оседают на поверхность пузырька.



В процессе сближения частиц с поверхностью пузырька важную роль играет ее форма и собственный размер. Наибольшее сближение линии тока жидкости с поверхностью пузырька достигается в экваториальной плоскости. Под влиянием БГВ частица смещается с линии тока жидкости, так что ее траектория в экваториальной плоскости удалена от поверхности на расстояние, превышающее радиус. Поэтому соприкосновения с поверхностью не происходит и величина  $b_{кр}$  не является критическим расстоянием.

Таким образом, величина  $b_{кр}$  уменьшается, во-первых, за счет отклонения линий тока жидкости под влиянием ДГВ и, во-вторых, за счет отклонения траектории частицы относительно линии тока под влиянием БГВ. Поэтому эффективность столкновения выражается в виде произведения двух сомножителей,  $E_0$  и  $f$ . Первый выражает влияние ДГВ, второй – БГВ.

В работах Рулева Н.Н. и Дерягина Б.В. проведен расчет эффективности захвата частицы в пренебрежении дальнодействием молекулярных сил. Формулы, полученные при стоковском и потенциальном распределении скоростей, имеют вид:

$$E_s = E_{0s} f_s, \quad (4.10)$$

$$E_p = E_{0p} f_p. \quad (4.11)$$

Получены следующие выражения:

$$E_s = E_{0s} f_s(w_s), \quad w_s = \frac{2AR_s^2}{27V_s\pi\eta r^4}, \quad (4.12)$$

$$E_p = E_{0p} f_p(w_p), \quad w_p = \frac{2AR_p}{27V_p\pi\eta r^3}, \quad (4.13)$$

где  $A$  – константа Гамакера.

Численный анализ универсальных функций  $f_s$  и  $f_p$  позволил следующим образом аппроксимировать формулы (4.12) и (4.13):

$$E_s \approx 0,11 \frac{r^{1,4}}{R_s^2} A^{1/6}, \quad (4.14)$$

$$E_p \approx 1,1 \frac{r^{0,8}}{R_p} A^{1/15}. \quad (4.15)$$

## 4.2. Способы флотации

Практикой очистки сточных вод, а также экспериментальными исследованиями, выработаны различные конструкции и способы флотационного разделения неоднородных систем. Наиболее существенные принципиальные отличия способов флотации связаны с насыщением жидкости пузырьками воздуха или газа [15]. По этому принципу выделяют следующие способы флотационной обработки сточных вод:

- флотация с механическим диспергированием воздуха (пневматическая, импеллерная, струйная);
- флотация с выделением воздуха из раствора (напорная, вакуумная);
- электрофлотация.

Флотация с механическим диспергированием воздуха. Пневматический способ аэрации заключается в том, что воздух вводят в машину под давлением, вдувая его через пористые перегородки или через патрубки [15]. Пневматическая флотация выгодно отличается от флотации других типов возможностью подачи воздуха в любом количестве и сравнительно небольшим расходом электроэнергии. В то же время пневматическая флотация имеет существенный недостаток. Воздух, который поступает в пневматические машины, плохо диспергируется и, в результате, образуются воздушные пузырьки повышенной крупности, что отрицательно сказывается на процессе флотации. Применение для этой цели пористых перегородок не дало положительного эффекта, так как их быстро забивает шламом, кроме того, водо-воздушная смесь в аппаратах подобного типа недостаточно интенсивно перемешивается. Плохое диспергирование воздуха в пневматических машинах вызывает снижение эффективности очистки и повышенный расход реагентов.

Пневматическую флотацию применяют при очистке сточных вод, содержащих примеси, агрессивные по отношению к механизмам (насосам, мешалкам) имеющим движущие части. Измельчение пузырьков воздуха достигается путем впуска воздуха во флотационную камеру через специальные сопла, которые располагаются на воздухораспределительных трубах, укладываемых на дно флотационной камеры на расстоянии 250–300 мм друг от друга. Продолжительность флотации  $t$  при таком диспергировании воздуха составляет 15–20 минут, но в каждом случае она должна устанавливаться экспериментально, так же, как и интенсивность аэрации. Глубина флотатора принимается 3–4 м, а его объем находят из формулы:

$$W = \frac{Q_{\text{сут}} t}{24 \times 60(1-a)}, \quad (4.16)$$

где  $a$  – коэффициент аэрации, который ориентировочно может быть принят 0,2–0,3.

Расход воздуха составляет

$$V = IF, \quad (4.17)$$

где  $F$  – площадь водного зеркала флотационной камеры;  
 $I$  – интенсивность аэрации (ориентировочно 15–20 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>).

Число сопел определяют по формуле:

$$n = \frac{V}{3600 f S}, \quad (4.18)$$

где  $f$  – площадь отверстия одного сопла ( $d = 1-1,2$  мм);

$S$  – скорость воздушной струи (100–200 м/с).

Пропуская воздух через мелкие отверстия, можно получить микропузырьки, способные более эффективно флотировать содержащиеся в жидкости загрязнения [14]. Для этого необходима относительно небольшая скорость истечения воздуха из отверстия, достаточное расстояние между отверстиями и наличие в жидкости реагентов-пенообразователей, способных снизить поверхностное натяжение на границе раздела фаз.

Размеры пузырьков для отверстий с радиусом менее 2 мм:

$$R = \sqrt[4]{r_o^2 \sigma_{\text{Г-ж}}}, \quad (4.19)$$

где  $r_o$  – радиус отверстия;

$\sigma_{\text{Г-ж}}$  – поверхностное натяжение на границе раздела жидкость – газ.

Пузырьки, выходящие из одного отверстия не должны сливаться. Поэтому максимальный расход воздуха через отверстия при спокойном движении воды у аэратора можно найти по следующей эмпирической формуле:

$$Q_{\text{макс}} = 104 r_o^2. \quad (4.20)$$

Формула (4.20) справедлива для отверстий диаметром менее 3 мм. Избыточное давление  $\Delta p$  и минимальная величина диаметра отверстия, через которое может проходить при таком давлении воздух, определяется уравнением Лапласа:

$$d_o = \frac{2\sigma_{г-ж}}{\Delta p}. \quad (4.21)$$

Флотация при подаче воздуха через различные пористые материалы имеет определенные преимущества: сохраняется простота конструкций флотационных камер; уменьшаются затраты на электроэнергию, отсутствуют сложные механизмы (насосы, импеллеры), что особенно важно при очистке агрессивных сточных вод. Недостатком является возможность зарастания и засорения пор и трудность подбора мелкопористых материалов, обеспечивающих подачу мелких и близких по размерам пузырьков.

Диспергирование газа в жидкости путем механического перемешивания называют агитационным. С помощью механических перемешивающих устройств, в качестве которых применяют лопастные, пропеллерные и турбинные вращающиеся мешалки, можно наиболее эффективно аэрировать неоднородные системы. Получение пузырьков заданных размеров, необходимых для флотации, связано с энергичным перемешиванием жидкости и созданием в ней большого количества мелких потоков. Это достигается в специальных флотационных аппаратах, оборудованных импеллерами. Механизм диспергирования воздуха в механических машинах является довольно сложным.

Во флотационных аппаратах механического типа в жидкости, интенсивно перемешиваемой вращающимися импеллерами, образуются круговые потоки, которые обеспечивают с одной стороны, засасывание атмосферного воздуха, а с другой – образование пузырьков путем дробления струи воздуха механическим воздействием жидкости [14]. Объем воздуха, засасываемый в единицу времени, зависит главным образом от частоты вращения импеллера, его размеров и глубины погружения. Количество засасываемого импеллером воздуха пропорционально кубу частоты вращения импеллера и моменту инерции лопасти импеллера  $I$  относительно оси вала:

$$I = \frac{h}{3}(l^3 - l_1^3), \quad (4.22)$$

где  $h$  – высота лопасти;  $l$  и  $l_1$  – радиусы от центра вращения до начала и конца лопасти.

Для работы импеллера необходимо затрачивать мощность пропорционально кубу его диаметра. При этом установлено, что введение дополнительного воздуха во флотационную камеру без интенсификации перемешивания не повышает эффективности флотации.

Достоинством импеллерной флотации является то, что обеспечивается хорошая аэрация жидкости. К недостаткам этого способа относится сложность конструкции, большой расход электроэнергии и наличие вращающихся и быстроизнашивающихся частей.

Флотация с выделением воздуха из раствора. Этот способ довольно широко применяется в практике очистки сточных вод, содержащих очень мелкие частицы загрязнений, поскольку позволяет получать самые мелкие пузырьки воздуха в сточной жидкости. Выделяющийся из такого раствора воздух образует микропузырьки, которые и флотируют содержащиеся в сточной жидкости загрязнения [15].

В зависимости от того, как создается пересыщенный раствор воздуха в воде, рассматриваемый способ флотации можно подразделить на вакуумную и напорную. Минимальные размеры пузырьков воздуха при некотором допущении могут быть определены на основании закона Генри

$$p_{\Pi} = kC, \quad (4.23)$$

где  $p_{\Pi}$  – парциальное давление воздуха в пузырьке;  $k$  – константа Генри, зависящая от свойств газа и его температуры;  $C$  – концентрация растворенного воздуха вокруг пузырька.

Давление в пузырьке также равно:

$$p_{\Pi} = p_{\text{ср}} + \frac{2\sigma_{\Gamma-ж}}{R}, \quad (4.24)$$

где  $p_{\text{ср}}$  – давление в среде, окружающей пузырек;  $\sigma_{\Gamma-ж}$  – поверхностное натяжение на границе газ-жидкость;  $R$  – радиус пузырька.

$$R_{\text{мин}} = \frac{2\sigma_{\Gamma-ж}}{kC - p_{\text{ср}}} = \frac{2\sigma_{\Gamma-ж}}{k(C - C_1)}. \quad (4.25)$$

Величина  $C - C_1$  определяет величину пересыщения раствора. Это уравнение при условии начальной насыщенности раствора можно представить в виде:

$$R_{\text{мин}} = \frac{2\sigma_{\text{Г-Ж}}}{P - P_1}, \quad (5.26)$$

где  $P - P_1$  – перепад давлений.

Из приведенных уравнений видно, что для образования мелких пузырьков следует понизить поверхностное натяжение на границе воздух-вода и увеличить перепад давления  $P - P_1$  или величину пересыщения  $C - C_1$ .

Количество воздуха, которое должно выделиться из пересыщенного раствора для обеспечения необходимого эффекта флотации можно определить экспериментально; обычно оно составляет 1–5 % от объема воды. При этом определяется либо величина разряжения (при вакуумной флотации), либо начальное давление (при напорной флотации).

Количество воздуха в случае напорной флотации можно определить по формуле:

$$y = (P - 1)b - (Pb - b_a)e^{-k_T t}, \quad (4.27)$$

где  $b$  – концентрация воздуха, соответствующая полному насыщению при данной температуре и атмосферном давлении;  $b_a$  – растворимость азота в воде при данной температуре и атмосферном давлении;  $k_T$  – константа скорости растворения газа в воде;  $t$  – продолжительность насыщения жидкости воздухом (обычно составляет 0,5–2 мин).

К числу недостатков этого способа следует отнести незначительную и ограниченную степень насыщения стоков пузырьками газа, что сужает диапазон применения вакуумной и напорной флотации и не позволяет применять ее для жидкостей со сравнительно высокой концентрацией нерастворенных примесей. Другим недостатком является необходимость сооружения герметически закрытых резервуаров, что сопряжено с определенными конструктивными и эксплуатационными трудностями.

*Электрофлотация.* Сущность электрофлотационного способа очистки сточных вод заключается в переносе вещества из жидкости на ее поверхность с помощью пузырьков газа, образующихся при электролизе воды [14]. Газовые пузырьки поднимаются в жидкости, сталкиваются с взвешенными частицами, прилипают к ним и флотируют их на поверхность жидкости.

Для питания электролизеров применяют постоянный ток. В процессе электролиза воды на катоде выделяется водород, на аноде – кислород. Основную роль в процессе флотации частиц выполняют, как правило, пузырьки, выделяющиеся с поверхности катода. Пузырьки газа возникают на поверхности электрода, растут и по достижении определенного диаметра отрываются от поверхности. Возникновение пузырьков на электродах, как и при кипении жидкости, происходит в некоторых точках – центрах газообразования (выступах, шероховатостях и т. п.). Размер пузырьков, отрывающихся от поверхности электрода, зависит не только от величины краевого угла смачивания, но и кривизны поверхности электрода. Замена пластинчатых катодов на проволочную сетку приводит к уменьшению крупности пузырьков, и, следовательно, к повышению эффективности очистки. С увеличением толщины проволоки размеры пузырьков возрастают.

Для получения требуемого числа пузырьков определенного размера необходим правильный подбор материала и диаметра проволоки катода, а также плотности тока. Изменяя плотность тока, можно варьировать степень насыщенности пульпы пузырьками и таким образом регулировать скорость флотационной очистки сточных вод.

В сточной жидкости при прохождении ее через межэлектродное пространство происходят такие процессы, как электролиз, поляризация частиц, электрофорез, окислительно-восстановительные реакции; продукты электролиза взаимодействуют друг с другом и с другими компонентами. Интенсивность перечисленных процессов зависит, во-первых, от химического состава жидкости, во-вторых, от материала электродов, которые могут быть растворимые и нерастворимые, и, в-третьих, от параметров электрического тока: напряжения, плотности на электродах.

В случае применения растворимых электродов (железных или алюминиевых) на аноде происходит анодное растворение металла, в результате чего в воду переходят катионы железа или алюминия, которые, встречаясь с гидроксильными группами, образуют гидраты окиси, являющиеся распространенными в практике водообработки коагулянтами.

Существенным преимуществом электрофлотации перед напорной флотацией является возможность неограниченного насыщения очищаемой жидкости пузырьками газа, а также простота осуществления процесса газонасыщения. Особенности, присущие электрофлотации, значительно расширяют область ее применения. Возможность неограниченного

газонасыщения воды пузырьками высокой дисперсности позволяет использовать электрофлотацию для извлечения мелких частиц, а простота процесса газонасыщения обеспечивает ей существенные преимущества перед другими видами флотации при очистке малых количеств загрязненных вод.

Недостатками электрофлотации является низкая степень насыщения воды пузырьками водорода (до 2 л на 1 м<sup>3</sup> жидкости), что вызывает необходимость увеличения длительности флотационного извлечения, что в свою очередь приводит к резкому и непропорциональному росту удельных энергозатрат. Кроме того, в процессе электрофлотации происходит анодное растворение металла, в результате чего в воду переходят катионы железа или алюминия. Это приводит к образованию гидроокисей и солей и может потребовать дополнительной очистки.

Еще одним из недостатков установок для электрофлотации является возможность образования при их работе взрывоопасной смеси газов, что требует проведения специальных мероприятий, обеспечивающих безопасные условия эксплуатации оборудования.

### 4.3. Конструкции флотационных установок

Для осуществления процессов флотационной водоочистки в настоящее время используются три основных типа аппаратов, в которых применены различные способы организации взаимодействия фаз [14]:

– пневматические, механические и пневмомеханические аппараты, в которых флотация осуществляется пузырьками, образующимися путем механического диспергирования воздуха (устройствами барботажного типа, механическими турбинами-импеллерами);

– аппараты с изменением давления, аэрация в которых обеспечивается выделением газов из пересыщенных растворов воздуха в воде (вакуумные и напорные аппараты);

– электрофлотационные аппараты.

*Пневматические флотационные аппараты.* Наибольшее распространение получили аппараты первого типа. Пневматические флотационные аппараты наиболее просты по устройству и принципу действия (рис. 4.2). Аэрация производится продуванием воздуха через отверстия под давлением 0,25–0,5 МПа. Диаметр отверстий сопел – 1–1,2 мм, скорость выхода струи воздуха из них 100–200 м/с. Струя воздуха при попадании в жидкость распадается на пузырьки средним диаметром 1,5 мм.



Расход воздуха составляет  $0,2-0,3 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  объема аппарата [15]. Для повышения эффективности очистки жидкости в аппаратах пневматического типа возникает необходимость в увеличении столба жидкости над барботажными устройствами, что приводит к резкому возрастанию энергозатрат. Отсутствие турбулизации жидкой фазы в таких аппаратах не обеспечивает высокой степени очистки промышленных стоков от тонкодисперсных и коллоидных взвесей.

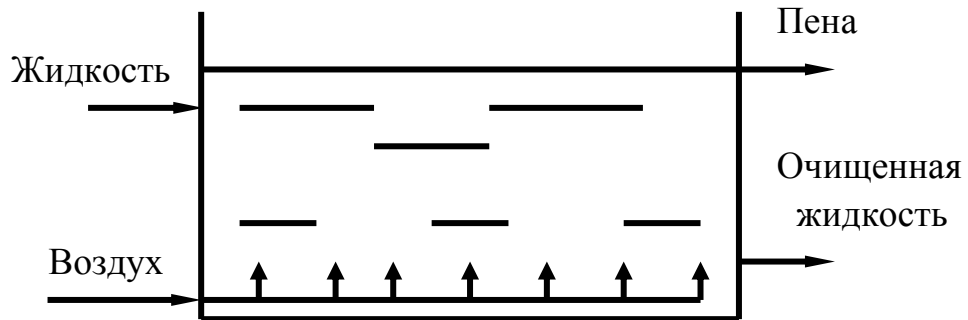


Рис.4.2. Схема пневмотического флотатора

Флотация при подаче воздуха через различные пористые материалы имеет определенные преимущества: сохраняется простота конструкций флотационных камер; отсутствуют сложные механизмы (насосы, импеллеры), а главное появляется возможность уменьшить дисперсность пузырьков газа. Недостатком является возможность зарастания и засорения пор и трудность подбора мелкопористых материалов, обеспечивающих подачу мелких и близких по размерам пузырьков.

Очистка небольших количеств сточной жидкости с диспергированием воздуха через пористые материалы может быть произведена на установках, близких по конструкции к аппарату, представленному на рис. 4.3 [15].

Сточная вода по трубопроводу подается в верхнюю часть вертикально установленного цилиндра высотой 2–4 м, в нижней части устанавливается поддон, под который закачивается воздух от компрессора. На поддоне крепятся керамические колпачки с отверстиями, через них сжатый воздух поступает в сточную жидкость, флотируя загрязнения. Осветленная вода забирается из нижней части цилиндра и через регулятор уровня отводится из установки, а пена переливается в кольцевой желоб и по трубе удаляется из него.

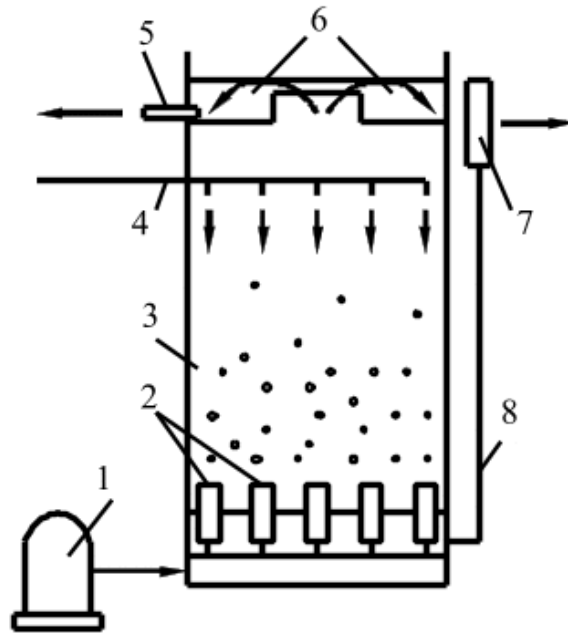


Рис. 4.3. Схема пневматической флотационной установки Н.А. Гребнева:  
 1 – компрессор; 2 – пористые колпачки; 3 – флотационная камера;  
 4 – подача загрязненной жидкости; 5 – шламоотводящая труба; 6 – желоб для сбора шлама;  
 7 – регулятор уровня; 8 – трубопровод для очищенной жидкости

Как видно из представленной схемы, в аппарате использован принцип противотока. Очистка на таких установках может производиться как в одну, так и в несколько ступеней.

Конструкция установки с диспергированием воздуха через пористые материалы для очистки больших количеств сточной жидкости представляет собой резервуар с горизонтальным движением воды, рис. 4.4.

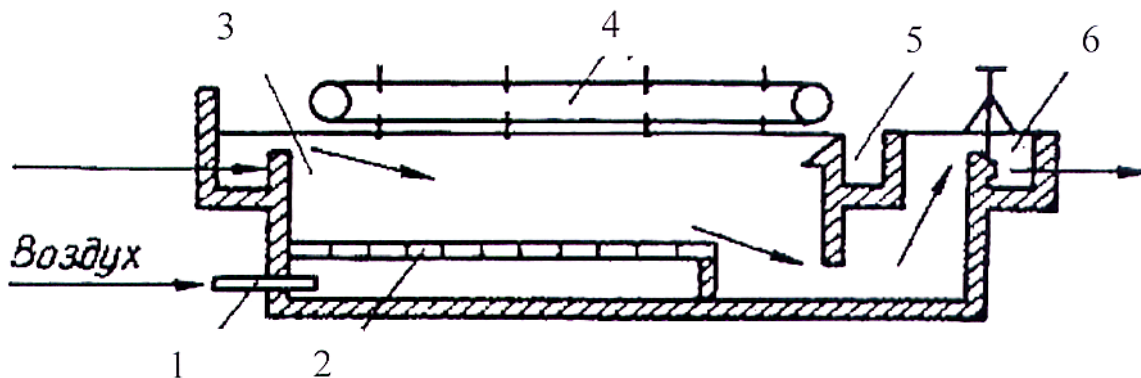


Рис. 4.4. Флотационная установка с диспергированием воздуха  
 через мелкопористые фильтры:  
 1 – трубопровод подачи воздуха; 2 – фильтровые пластины;  
 3 – флотационная камера; 4 – скребок; 5 – шламоприемник;  
 6 – регулятор уровня воды на выпуске

Воздух во флотационную камеру подается через мелкопористые фильтросы, уложенные на дне. Сточная жидкость подается в приемную часть флотационной камеры и отводится из нижней части через регулятор уровня. Пена скребковым транспортером собирается в отводящий желоб.

По опытным данным величина отверстий должна быть в среднем от 4 до 20 мкм, давление воздуха – 0,1–0,2 Мпа, расход воздуха –  $40\text{--}70 \text{ м}^3/\text{м}^2$  или  $0,24\text{--}0,31 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , продолжительность флотации 20–30 мин.

*Импеллерные установки.* Для интенсификации флотационного процесса используют различные типы перемешивающих устройств, что обеспечивает не только дополнительное развитие межфазной поверхности, но и частичную турбулилизацию жидкой фазы. Среди рассматриваемых типов аппаратов можно выделить флотатор с самовсасывающей турбинной мешалкой – импеллером (рис. 4.5), который обеспечивает высокую степень аэрации жидкой фазы, достигающую до  $1 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  объема аппарата и позволяет очищать стоки с высокой концентрацией загрязнений. Средний диаметр пузырьков, получаемых в аппарате импеллерного типа – 0,5–1,2 мм.

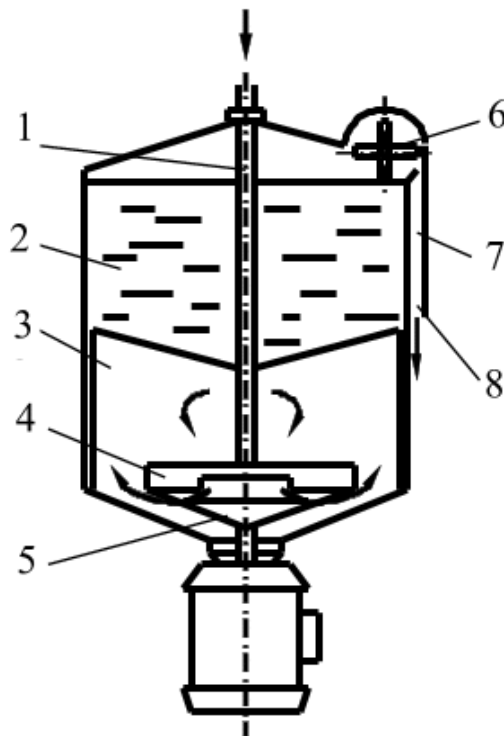


Рис. 4.5. Установка импеллерной флотации:

- 1 – подвод воздуха; 2 – флоторазделитель; 3 – направляющие перегородки;  
4 – статор; 5 – ротор (импеллер); 6 – пеноотъемочное устройство; 7 – пеноприемник;  
8 – сброс пенного продукта

Как показала промышленная эксплуатация аппаратов с мешалками, увеличение энергетических затрат не сопровождается адекватным повышением эффективности процесса. Только на начальной стадии рост эффективности аэрации в жидкой фазе имеет приблизительно линейный характер. Дальнейшее увеличение подводимой мощности не приводит к уменьшению диаметра пузырьков газа и росту межфазной поверхности. С другой стороны, усиление аэрации сопровождается снижением эффективности перемешивающего устройства из-за роста газосодержания и уменьшения плотности газожидкостной среды. Поэтому все аппараты с принудительным перемешиванием имеют высокий показатель удельных энергозатрат, а эффективность очистки в них не превышает 60–70 %.

Современные установки для механического диспергирования газа содержат следующие элементы: флоторазделитель, в котором осуществляется насыщение очищаемой воды пузырьками, образуются флотокомплексы и всплывают минерализованные пузырьки; ротор (импеллер), приводимый в движение электродвигателем. Импеллер закрыт статором. При вращении импеллера образуется зона пониженного давления, которая способствует поступлению к нему воды и воздуха. Воздух подсасывается через центральную трубу, одновременно через отверстия на лопасти импеллера поступает небольшое количество воды, которая перемешивается с воздухом и выбрасывается через боковые отверстия во флотационную камеру. Неподвижный перфорированный статор ограничивает объем соприкасающейся с ротором воды и предотвращает вовлечение ее во вращение, что способствует увеличению масштаба и частоты турбулентных пульсаций и, соответственно, дисперсности пузырьков. Отбойные направляющие и успокоительные перегородки обеспечивают как благоприятные условия дробления пузырьков, так и разделение фаз.

Скорость вращения импеллера принимают в пределах 450–700 об/мин., расход диспергированного воздуха составляет 0,6–1,8 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup> поверхности флоторазделителя. Расход электроэнергии – около 0,4 кВт/час на 1 м<sup>3</sup> очищаемой воды.

*Напорные и вакуумные флотационные аппараты.* Другим типом флотаторов, получивших распространение в практике очистки сточных вод, являются флотаторы с выделением воздуха из раствора. Высокая дисперсность выделяющихся из раствора пузырьков позволяют получать большую межфазную поверхность, которая составляет 3–7 м<sup>2</sup> на 1 м<sup>3</sup> воды [15]. В зависимости от того, как создается пересыщенный раствор воздуха в воде, разделяют вакуумные (рис. 4.6) и напорные (рис. 4.7) флотационные аппараты.

Вакуумная флотационная установка, предназначенная для предварительной очистки сточных вод, представляет собой герметический резервуар диаметром 10,5 м и высотой 3,6 м с купольным перекрытием.

Под днищем резервуара имеется технологическое помещение, где размещаются подающие и отводящие трубы, шламо- и грязеприемник, насосы для откачки шлама и пульт управления. Сточная жидкость, поступающая на флотацию, предварительно насыщается воздухом в течение 1–2 мин. В аэрационной камере механическим аэратором. Затем, под действием разрежения, сточные воды поднимаются во флотационную камеру, где оказываются под пониженным давлением.

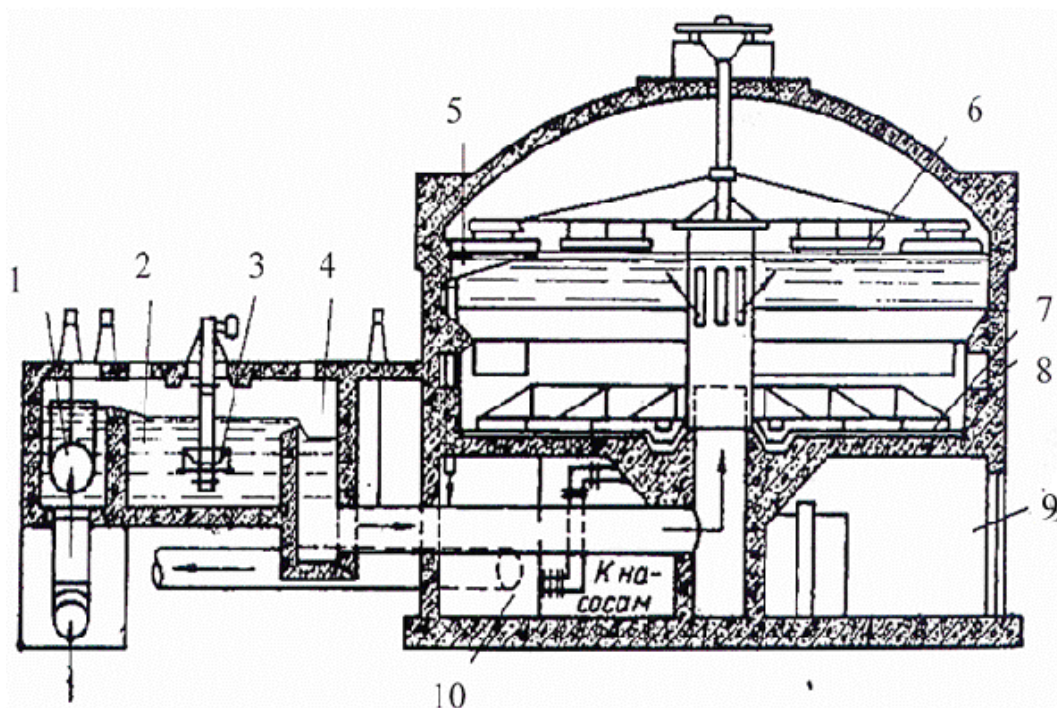


Рис. 4.6. Схема вакуумного флотатора:

- 1 – регулятор поступления сточной жидкости; 2 – аэрационная камера; 3 – аэратор;  
 4 – деаэрактор; 5 – лоток для приема шлама; 6 – поверхностные скребки;  
 7 – донные скребки; 8 – кольцевой желоб для отвода очищенной воды;  
 9 – техническое помещение; 10 – шламоприемник

Растворившийся при атмосферном давлении воздух выделяется в виде микропузырьков и выносит часть загрязнений в пенный слой. Скапливающаяся пена вращающимися скребками отводится в пеносборник, а оттуда – в грязеприемник. Кроме поверхностных, флотационная камера оборудована еще донными скребками для удаления осадка, выпавшего на дно. Осветленная вода собирается кольцевым желобом, отделенным от камеры дырчатой перегородкой из листовой стали, и направляется на дальнейшую обработку.

Разрежение во флотационной камере составляет 225–300 мм рт. ст. и первоначально создается вакуум-насосом. Продолжительность пребывания сточной жидкости в камере флотации 20 мин.

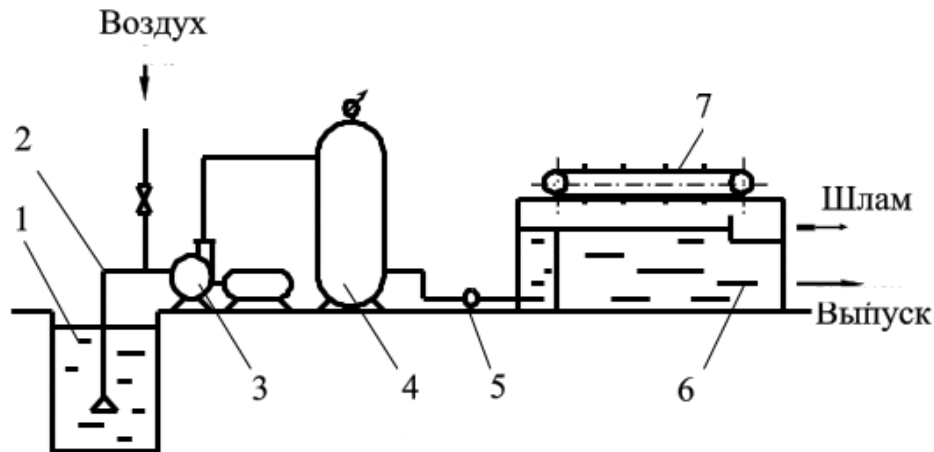


Рис. 4.7. Схема напорного флотатора:

- 1 – приемный резервуар; 2 – всасывающий трубопровод; 3 – насос;  
4 – напорный бак; 5 – регулятор давления; 6 – флотационная камера;  
7 – поверхностные скребки

Напорная флотация обладает более широкими возможностями, чем вакуумная, так как позволяет в более широких пределах регулировать степень пересыщения жидкости и подбирать ее в соответствии с желаемым эффектом флотации. При давлении 0,3-0,5 МПа и температуре стоков 20–30 °С достигается содержание воздуха от 30 до 50 литров на 1 м<sup>3</sup> жидкости [15]. Недостатками метода является необходимость сооружения герметичных аппаратов, а также необходимость перекачивания под давлением всего объема жидкости и, как следствие, высокие эксплуатационные расходы.

При напорной флотации сточные воды во флотационную камеру подаются с помощью насоса, который также насыщает жидкость воздухом. Из приемного резервуара сточные воды забираются насосом и перекачиваются через напорный резервуар в приемное отделение флотационной камеры. На всасывающем трубопроводе насоса имеется патрубок для подсоса воздуха. Воздух поступает через насос в напорный резервуар и в результате повышения давления растворяется в жидкости. Объем напорного резервуара рассчитывается на необходимую продолжительность насыщения (от 0,5 до 5 мин.).

*Электрофлотационные аппараты.* В последнее время в промышленной практике получили распространение электрофлотационные аппараты, представленные на рис. 4.8. [15].

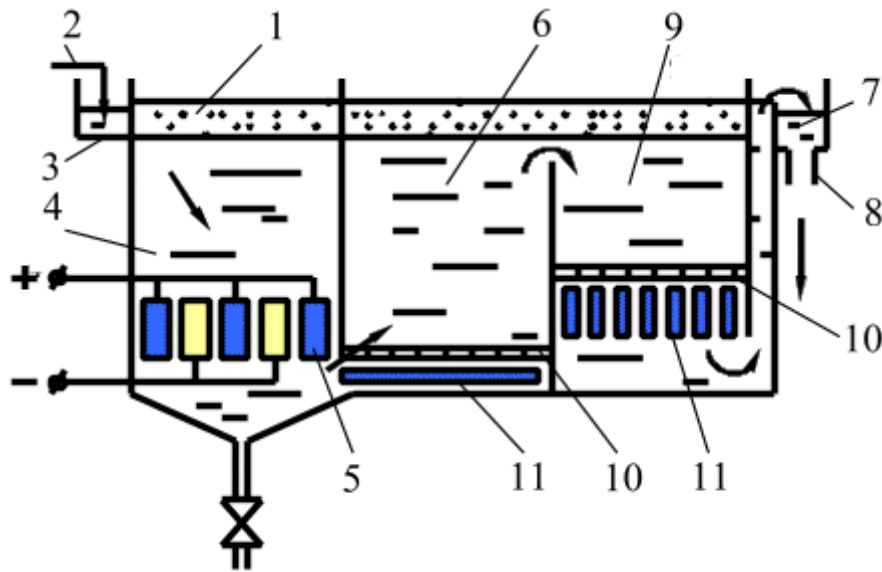


Рис. 4.8. Многоступенчатая установка для электрофлотационной очистки воды:  
 1 – пенный продукт; 2 – подача очищаемой воды; 3 – лоток очищаемой воды;  
 4 – 1-я ступень установки; 5 – система растворимых электродов;  
 6 – 2-я ступень установки; 7 – лоток очищенной воды; 8 – отвод очищенной воды;  
 9 – 3-я ступень установки; 10 – сеточный катод; 11 – анод из графитовых пластин

*Струйные флотационные аппараты.* Особый интерес представляют струйные флотационные аппараты, использующие кинетическую энергию падающей струи жидкости, что позволяет существенно снизить энергозатраты на очистку стоков по сравнению с другими флотационными установками. В струйных аппаратах процесс аэрации осуществляется за счет инжектирования газа падающей струей жидкости (рис. 4.9). Проникая вместе со струей жидкости на глубину до 1 м, газ, под действием кинетической энергии струи, дробится на мелкие пузырьки, образуя газожидкостную систему с сильной турбулизацией среды и развитой межфазной поверхностью [15].

Применение струйных флотационных установок сдерживается слабой изученностью гидродинамики взаимодействующих фаз, количества инжектируемого газа, дисперсного состава газовой фазы и эффективности очистки, в условиях турбулизации и циркуляции зоны всплывания пузырьков воздуха, что накладывает особые условия на протекание процесса струйной флотации.

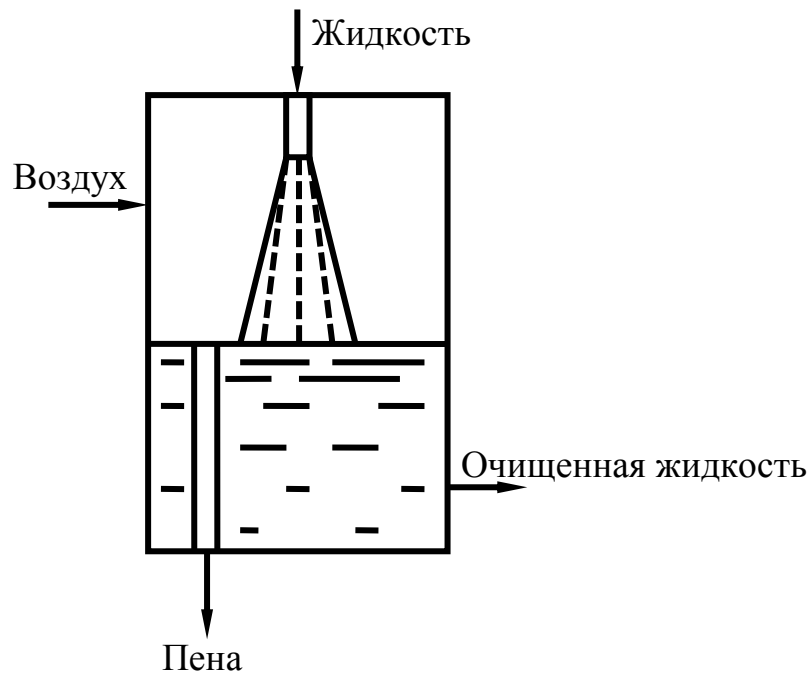


Рис. 4.9. Схема струйной флотации

#### 4.4. Пример расчета флотатора

**Исходные данные.** Расход сточных вод  $Q - 1900 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; продолжительность флотации  $t_{\text{ф}} - 25 \text{ мин}$ ; скорость движения воды во флотационной камере  $u_{\text{ф}} = 10,8 \text{ м/ч}$ .

**Решение.** Объем флотационной камеры  $V_{\text{ф}}$ :

$$V_{\text{ф}} = 0,025Q \cdot t_{\text{ф}} = 0,025 \cdot \frac{19000}{60} \cdot 25 = 19,792 \text{ м}^3.$$

Пропускная способность флотатора  $Q_{\text{ф}}$

$$Q_{\text{ф}} = 36d_{\text{и}}^2 H_{\text{ф}} / (0,025t_{\text{ф}}),$$

где  $H_{\text{ф}}$  – высота флотационной камеры, принимается равной 1,5–3 м;  
 $d_{\text{и}}$  – диаметр импеллера,  $d_{\text{и}} = 200\text{--}750 \text{ мм}$ .

Выбираем  $H_{\text{ф}} = 2 \text{ м}$ ,  $d_{\text{и}} = 300 \text{ мм}$ , тогда:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ф}} &= 36d_{\text{и}}^2 H_{\text{ф}} / (0,025t_{\text{ф}}) = \frac{36 \cdot (0,3)^2 \cdot 2}{0,025 \cdot 25} = 10,37 \text{ м}^3/\text{мин} = \\ &= 10,37 \cdot 60 = 622,2 \text{ м}^3/\text{ч}. \end{aligned}$$



Количество подаваемого импеллером воздуха:

$$Q_B = 0,000278B_{уд}F,$$

где  $B_{уд}$  – удельный расход воздуха;  $B_{уд}=40-50$  м<sup>3</sup>/ч на 1 м<sup>2</sup> площади поверхности флотационной камеры; примем  $B_{уд}=45$  м<sup>3</sup>/ч.

Площадь водного зеркала флотационной камеры:

$$F = \frac{\pi D_k^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 14,97^2}{4} = 175,924 \text{ м}^2,$$

где  $D_k$  – диаметр камеры:

$$D_k = \sqrt{\frac{4Q}{\pi \cdot u_{\phi}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1900}{3,14 \cdot 10,8}} = 14,97 \text{ м}.$$

Тогда количество подаваемого импеллером воздуха равно:

$$Q_B = 0,000278 \cdot 45 \cdot 175,92 = 2,2 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Необходимое число флотационных камер  $n_{\phi}$

$$n_{\phi} = \frac{Q}{Q_{\phi}} = \frac{1900}{622,2} = 3 \text{ шт.}$$

#### 4.5. Коагуляция

Коагуляция – это слипание частиц коллоидной системы при их столкновении в процессе теплового движения [5], перемешивания или направленного перемещения во внешнем силовом поле. В результате коагуляции образуются агрегаты – более крупные (вторичные), состоящие из скопления мелких (первичных). Первичные частицы в таких агрегатах соединены силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно или через прослойку окружающей (дисперсионной) среды. Коагуляция сопровождается прогрессирующим укрупнением и уменьшением

их общего числа в объеме дисперсионной среды (в нашем случае – жидкости). Слипание однородных частиц называется монокоагуляцией, а разнородных – гетерокоагуляцией.

В сточных водах могут содержаться твердые (каолин, глина, цемент, кристаллы солей и др.) и жидкие (нефть, нефтепродукты, смолы и др.) частицы. Сточные воды в большинстве случаев представляют собой слабоконцентрированные эмульсии или суспензии, содержащие коллоидные частицы размером 0,001–0,1 мкм, мелкодисперсные частицы размером 0,1–10 мкм, а также частицы размером 10 мкм и более.

В процессе механической очистки из сточных вод достаточно легко удаляются частицы размером 10 мкм и более, мелкодисперсные и коллоидные частицы практически не удаляются. Сточные воды многих производств после сооружений механической очистки представляют собой агрегативно-устойчивую систему. Для их очистки применяют методы коагуляции; агрегативная устойчивость при этом нарушается, образуются более крупные агрегаты частиц, которые удаляются из сточных вод механическими методами.

Одним из видов коагуляции является флокуляция, при которой мелкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии, под влиянием специально добавляемых веществ (флокулянтов) образуют интенсивно оседающие рыхлые хлопьевидные скопления.

Эффективность коагуляционной очистки зависит от многих факторов: вида коллоидных частиц; их концентрации и степени дисперсности; наличия в сточных водах электролитов и других примесей; величины электрокинетического потенциала.

В качестве коагулянтов используют соли алюминия, железа, а также смеси солей  $Al_2(SO_4)_3$  и  $FeCl_3$  в соотношении от 1:1 до 1:2 и алюминий содержащие отходы, травильные растворы, шлаки, пасты и смеси [5].

Для интенсификации образования хлопьев гидроксидов алюминия и железа используют флокулянты: активную кремниевую кислоту ( $x SiO_2$  у  $H_2O$ ) и полиакриламид. Дозу полиакриламида при вводе перед отстойниками или осветлителями с взвешенным осадком принимают равной от 0,4 до 1,5 мг/л; дозу кремниевой кислоты – 2–3 мг/л.

При использовании в качестве коагулянтов солей алюминия и железа в результате реакции гидролиза образуются малорастворимые в воде гидроксиды железа и алюминия, которые сорбируют на развитой хлопьевидной поверхности взвешенные, мелкодисперсные и коллоидные вещества и при благоприятных гидродинамических условиях оседают на дно отстойника, образуя осадок.

Процесс очистки сточных вод методом коагуляции или флокуляции включает приготовление водных растворов коагулянтов или флокулянтов, их дозирование, смешение со всем объемом сточной воды, хлопьеобразование, выделение хлопьев из нее. Приготавливают и дозируют коагулянты в виде растворов или суспензий. Растворяют их в баках (не менее двух) до концентрации 10–17 %. Продолжительность растворения при температуре воды 10 °С – 10–12 ч.

Коагулянты смешивают с обрабатываемой сточной водой в смесителях, продолжительность пребывания воды в которых составляет 1–2 мин.

Применяют перегородчатые, дырчатые, шайбовые вертикальные смесители, а также механические с пропеллерными или лопастными мешалками.

*Дырчатый смеситель* (рис. 4.10) представляет собой лоток с дырчатыми перегородками. Расстояние между перегородками принимают равным ширине лотка. Диаметр отверстий 20–100 мм. Суммарная площадь отверстий в каждой перегородке  $S_{отв} = Q/v_0$ . Скорость движения воды в отверстиях  $v_0 = 1$  м/с, а в лотке за последней перегородкой  $v_0 = 0,6$  м/с. Уровень воды за последней перегородкой принимают равной  $H_0 = 0,4–0,5$  м. Потерю напора в отверстиях определяют по формуле:

$$h = \xi \frac{v_0^2}{2g}, \quad (4.28)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления.

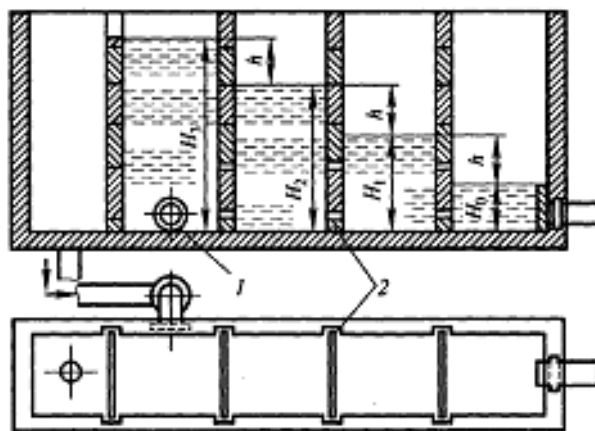


Рис. 4.10. Дырчатый смеситель:

1 – подача воды; 2 – перегородка с отверстиями

Прибавляя к  $H_0$  величину потеряннного напора  $h$ , находят уровень воды в каждом отделении смесителя.

*Вертикальный смеситель* (рис. 4.11) – цилиндр с коническим днищем. Перемешивание в нем достигается изменением скорости движения в конической части. Скорость в нижнем конусе сечения равна 1 м/с, а в верхней цилиндрической части – 25 мм/с. Время пребывания воды в камере  $t_{см} = 1,5-2$  мин.

Зная расход воды  $Q$  (в м<sup>3</sup>/с) и скорость ее движения в цилиндрической части  $v_{ц}$ , можно рассчитать диаметр цилиндрической части:

$$D_{ц} \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_{ц}}}. \quad (4.29)$$

Высоту конической части находят из соотношения:

$$h_{к} = \frac{(D_{ц} - d_{п})}{2 \sin \frac{\varphi}{2}}, \quad (4.30)$$

где  $d_n$  – диаметр входного патрубка;  $\varphi$  – угол конусности.

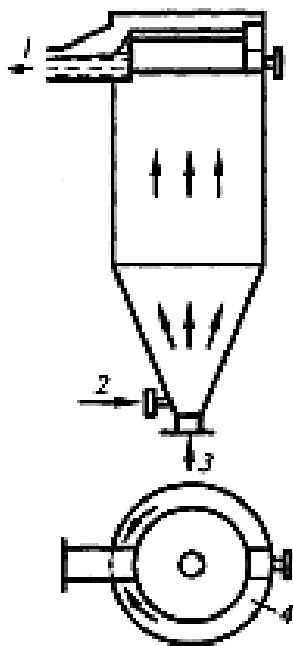


Рис. 4.11. Вертикальный смеситель:

1 – выпуск сточных вод; 2 – подача реагентов; 3 – подача сточных вод; 4 – лоток

Объем конической части находят по уравнению:

$$V_K = \frac{\pi}{3} h_K \left[ \left( \frac{D_{\Pi}}{2} \right)^2 + \left( \frac{d_{\Pi}}{2} \right)^2 + \frac{D_{\Pi}}{2} \frac{d_{\Pi}}{2} \right]. \quad (4.31)$$

Объем смесителя  $V_{\text{см}} = Q \cdot t_{\text{см}}$ .

Высота цилиндрической части определяется по соотношению:

$$h_{\Pi} = \frac{V_{\text{см}} - V_K}{S_{\Pi}}. \quad (4.32)$$

Общая высота смесителя  $H_{\text{см}} = h_K + h_{\Pi}$ .

Трубопроводы или лотки, отводящие воду из смесителей в камеры хлопьеобразования и осветлители с взвешенным осадком, рассчитывают на скорость движения сточной воды 0,8–1 м/с и продолжительность ее пребывания в них не более 2 мин. После смешения сточных вод с коагулянтами начинается процесс образования хлопьев, который происходит в камерах хлопьеобразования. Эти камеры могут быть водоворотные, перегородчатые, вихревые, а также с механическим перемешиванием.

Водоворотная камера хлопьеобразования представлены на рис. 4.12.

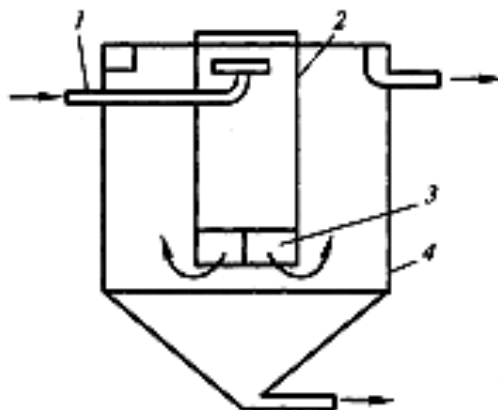


Рис. 4.12. Водоворотная камера:

1 – подвод воды; 2 – камера; 3 – гаситель; 4 – отстойник

Водоворотные камеры хлопьеобразования представляют собой цилиндр, в верхнюю часть которого из смесителя вводится сточная вода с вращательной скоростью на выходе из сопла 2–3 м/с. В нижней части камеры перед выходом в отстойник находятся гасители вращательного движения воды.

Время пребывания воды в камере принимают равным  $t_k = 15-20$  мин, а время отстаивания  $t_{oc} = 1$  ч. Скорость выхода воды из сопла  $v_c = 2-3$  м/с, высота камеры  $H_k = 3,6-4$  м. Водоворотные камеры конструктивно объединяют с вертикальными отстойниками.

Задаваясь числом камер хлопьеобразования  $n_k$  и зная расход воды, определяют площадь одной камеры и ее диаметр:

$$S_k = \frac{q_{\max} t_k}{n_k H_k}, \quad (4.33)$$

$$d_k = \sqrt{\frac{4S_k}{\pi}}. \quad (4.34)$$

Сопло размещают на расстоянии  $0,2 d_k$  от стенки камеры на глубине  $0,5$  м от поверхности воды. Диаметр сопла:

$$d_c = 1,13(q'_{\max} / \mu v_c)^{1/2}, \quad (4.35)$$

Где  $q'_{\max}$  – максимальный расход сточной воды на одно сопло, м<sup>3</sup>/с;  
 $\mu$  – коэффициент расхода (равен 0,908).

Объем зоны осаждения  $V$ , а высота зоны осаждения  $H_{oc} = H_k + 0,5$ .

Диаметр отстойника рассчитывают по формуле:

$$D_{отс} = 1,13[(V_{oc} + V_{к.х.}) / H_{oc}]^{1/2}. \quad (4.36)$$

*Вихревая камера хлопьеобразования* представляет собой конический или цилиндрический расширяющийся кверху резервуар с нижним впуском сточной воды со скоростью  $0,7-1,2$  м/с. Угол наклона стенок камеры к горизонту около  $70^\circ$ , скорость восходящего потока сточной воды на уровне выпуска  $4-5$  мм/с, продолжительность пребывания воды в камере  $6-10$  мин.

В камерах хлопьеобразования с лопастными мешалками продолжительность пребывания воды  $20-30$  мин, а скорость движения воды  $0,15-0,2$  м/с.

Если в сточных водах концентрация взвешенных веществ, способных к агрегации, не превышает  $4$  г/л, то применяют осветлители с взвешенным слоем осадка (рис. 4.13). В осветлителях происходят три основных процесса: смешение, коагуляция и осветление сточных вод.

Обрабатываемая в осветлителях сточная вода проходит снизу вверх через слой ранее выделившегося шлама с такой скоростью, при которой взвешенные частицы не уносятся из зоны взвешенного осадка.

При движении сточной воды через взвешенный слой увеличивается эффект задержания мелких суспензированных частиц. Осветлители проектируются круглыми (диаметр до 15 м) или прямоугольными в плане, площадь осветлителя не должна превышать  $150 \text{ м}^2$  [5].

Для обеспечения нормальной работы осветлителя сточную воду после смешения с коагулянтами направляют в воздухоотделитель, где она освобождается от пузырьков воздуха, выделяющихся в результате реакций.

Величина восходящей скорости потока в зоне осветления зависит от концентрации взвешенных веществ. Так, при обработке сточных вод сульфатом алюминия при содержании взвешенных веществ до 400 мг/л, расчетная скорость восходящего потока  $v_{\text{расч}} = 0,8\text{--}1 \text{ мм/с}$ ; 400–1000 мг/л –  $v_{\text{расч}} = 1\text{--}1,1 \text{ мм/с}$ ; 1000–2500 мг/л –  $v_{\text{расч}} = 1,1\text{--}1,2 \text{ мм/с}$ .

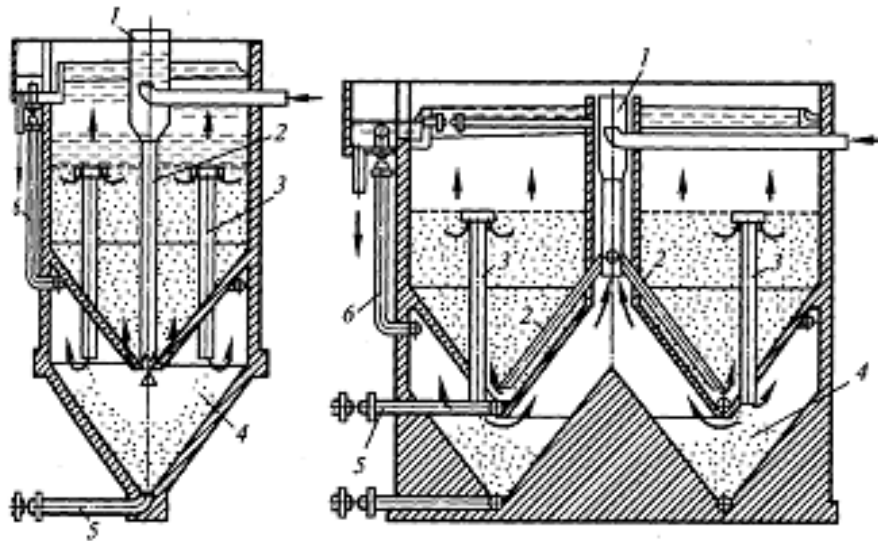


Рис. 4.13. Осветлители с взвешенным слоем осадка:

1 – воздухоотделитель; 2 – опускные трубы; 3 – осадкоотводные трубы или окна; 4 – осадкоуплотнитель; 5, 6 – трубопроводы выпуска осадка и отвода осветленной воды из осадкоуплотнителя

Исходя из концентрации взвешенных веществ в обрабатываемой сточной воде  $C_{\text{н}}$ , при известных расчетной скорости восходящего потока воды в зоне осветления  $v_{\text{расч}}$ , эталонной концентрации взвешенных веществ во взвешенном слое  $C$ , (при скорости движения воды 1 мм/с и температуре 20 °С) и концентрации взвешенных веществ в осадке после его уплотнения  $C_{\text{шл}}$ , можно определить расход воды и размеры осветлителя.

Расчетный расход сточной воды  $Q_{\text{расч}}$ , м<sup>3</sup>/ч, проходящей через осветлитель, определяется по формуле:

$$Q_{\text{расч}} = Q_{\text{осв}}[1 + (C_{\text{н}} - C_{\text{к}})/C_{\text{шл}}], \quad (4.37)$$

где  $Q_{\text{осв}}$  – расход сточных вод, выходящих из осветлителя, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{\text{к}}$  – конечная концентрация взвешенных веществ в сточной воде, г/м<sup>3</sup>.

Площадь осветлителя  $S_{\text{осв}}$ , м<sup>2</sup>, с вертикальным осадкоуплотнителем находят по выражению:

$$S_{\text{осв}} = S_{3.0} + S_{0.у} = Q_{\text{осв}}[1 + (C_{\text{н}} - C_{\text{к}})/C_{\text{шл}}][k_{\text{р}} + \varphi(1 + k_{\text{р}})]/v_{\text{расч}}, \quad (4.38)$$

где  $S_{3.0}$  и  $S_{0.у}$  – площадь зоны соответственно осветлителя и осадкоуплотнителя, м<sup>2</sup>;  $k_{\text{р}}$  – коэффициент распределения воды между зоной осветления и осадкоуплотнителем, равный:

$$k_{\text{р}} = 1 - (C_{\text{н}} - C_{\text{к}})/C_{\text{э}}, \quad (4.39)$$

$\varphi$  – коэффициент подсоса осветленной воды в осадкоуплотнитель, равный 1,15–1,2.

Объем зоны накопления и уплотнения осадка  $V_{3.у}$  (часть объема осадкоуплотнителя, которая расположена на 0,5–0,7 м ниже нижней кромки осадкоотводящих окон или труб) должен удовлетворять условию:

$$V_{3.у} \geq Q_{\text{расч}} t_{\text{шл}}(C_{\text{н}} - C_{\text{к}})/C_{\text{шл}}, \quad (4.40)$$

где  $t_{\text{шл}}$  – продолжительность уплотнения шлама, равная 3–6 ч.

*Электрохимическое коагулирование* [5]. Для осуществления процесса коагуляции в воду могут быть введены вместо коагулянтов ионы тяжелых металлов, полученные электрохимическим путем. Для этого воду пропускают через электролизер – аппарат с опущенными в него электродами анода (из алюминия или железа) и катода. Питание электролизера осуществляется от постоянного или переменного источника тока. Схема работы электрокоагулятора приведена на рис. 4.14.

Большинство аппаратов для очистки воды электрокоагуляцией представляет собой безнапорные пластинчатые электролизеры



горизонтального или вертикального типа. Пластины или кольца металла располагаются вертикально на расстоянии 3–0 мм одна от другой и удерживаются изолирующими вставками, электрический ток подводится к каждой пластине (рис. 4.14). Для упрощения монтажа электрокоагуляторов и уменьшения потребляемой силы тока применяют биполярное подключение электродов, т.е. подвод тока не к каждой пластине, а через несколько пластин. Промежуточные пластины растворяются вследствие поляризации в возникающем электрическом поле.

При применении растворимых металлических электродов электродный процесс сопровождается рядом электрохимических явлений и реакций, их скорость по законам электрохимической кинетики определяется общим значением потенциала на границе металл – раствор, составом воды и условиями диффузии в ней компонентов или продуктов реакции. В процессе электролиза на электродах восстанавливаются или окисляются компоненты электролита.

В переносе тока принимают участие все находящиеся в воде ионы, а также имеющие заряд коллоидные и взвешенные частицы. По С.В. Яковлеву и Я.Д. Раппопорту, коллоидные и взвешенные частицы в связи с малой подвижностью переносят незначительную часть электричества. В основном перенос электричества в природных водах осуществляют катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и анионы  $\text{SO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Cl}^-$ , а также ионы  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , всегда содержащиеся в воде.

Количество металла ( $m$ ), перешедшего из анода в воду в результате электролиза, определяют из выражения:

$$m = \eta \cdot A \cdot I \cdot t / (nF), \quad (4.41)$$

где  $A$  – атомная масса металла;  $F$  – число Фарадея (96500 Кл);  $I$  – сила тока, А;  $t$  – время прохождения тока, с;  $\eta$  – коэффициент выхода металла по току, %;  $n$  – валентность металла.

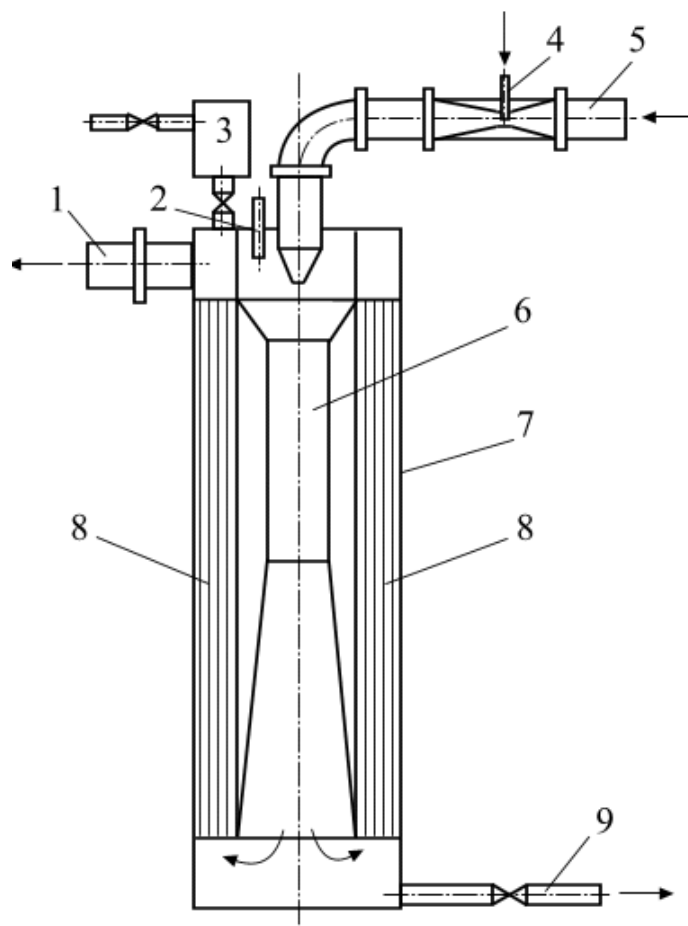


Рис. 4.14. Электрокоагулятор систем Е.Ф. Кургаева:

1 и 5 – отвод и подача обрабатываемой воды; 2 – отражатель; 3 – реагент;  
4 – всас воздуха; 6 – диффузор; 7 – корпус; 8 – электроды; 9 – слив

По П.П. Строкачу, электрохимическое растворение металлов состоит из двух основных процессов – анодного и химического растворения в результате взаимодействия с окружающей средой. Растворению металла анода способствуют повышение температуры воды, присутствие в ней ионов-депассиваторов, наложение постоянного электрического тока, повышение скорости движения воды по отношению к поверхности металла. Поэтому выход алюминия по току может достигать 120 % и более. В соответствии с теорией электрохимической коррозии, при использовании в качестве анода железа или алюминия, в природной воде протекают реакции анодного растворения и образования гидроксидов этих металлов. На катоде из железа или алюминия в природной воде происходят деполяризация мигрирующими ионами, деполяризация нейтральными молекулами, восстановление ионов металлов и нерастворимых пленок, а также органических соединений. На алюминиевом катоде при  $\text{pH} = 10\text{--}12$  в прикатодном слое вероятна реакция взаимодействия алюминия с водой

с образованием гидроксида алюминия и водорода во время электролиза и растворения защитной пленки оксида алюминия. Из вышеуказанных катодных процессов в природной воде главенствующим является водородная и кислородная деполяризация.

Электрохимические процессы на металлических электродах сопровождаются адсорбцией на них неорганических и органических веществ, которые могут ускорять или замедлять электрохимические реакции, выделением на электродах пузырьков водорода, кислорода, которые способны выносить вещество из жидкости на поверхность (электрофлотация), электрофорезом (движение в воде взвешенных твердых и коллоидальных частиц, пузырьков газа) и другими явлениями.

С.В. Яковлев и П.П. Строкач, Я.Д. Раппопорт указывают, что на процесс растворения электродов влияют физикохимические, электрические и гидродинамические факторы: активная реакция среды, ее солевой состав, температура, состав электрода, плотность тока, частота смены полярности, скорость движения воды в межэлектродном пространстве и др. Важное значение при электрокоагуляции имеет плотность тока. Наиболее эффективна работа электролизера при высоких плотностях тока, поскольку при этом более полно используется их емкость и рабочая поверхность электродов. Вместе с тем при повышении плотности тока возрастают поляризационные явления и пассивация электродов, что приводит к увеличению напряжения и потерям электроэнергии на побочные процессы. С увеличением плотности тока возрастает скорость химического растворения алюминия и тем в большей степени, чем меньше его частота. Рекомендуется устанавливать плотность тока в пределах  $0,5\text{--}20\text{ мА/см}^2$ , расстояние между электродами  $10\text{--}15\text{ мм}$ . По мнению Л.А. Кульского, П.П. Строкача и В.А. Слипченко, эффективной плотностью тока для удаления из воды большинства загрязнений может быть  $1\text{--}4\text{ мА/см}^2$ , рабочее напряжение на электродах установок не должно превышать  $40\text{ В}$ .

Для предотвращения образования осадка на электродах рекомендуется менять на них полярность тока, что не всегда эффективно, так как в период переключения полярности резко снижается выход алюминия по току и трудно удаляются осадки на электродах.

Окисление металлов электродов при электролизе осложняется наступлением пассивного состояния в результате формирования оксидной пленки. При этом потенциал анода смещается в сторону положительных значений. Активность алюминиевого анода в значительной мере зависит от природы и концентрации присутствующих в воде анионов.

Из всех анионов на активность алюминиевого анода более всего влияет хлорид-ион. Сущность активизирующего действия хлорид-ионов связана с их небольшими геометрическими размерами и легкостью проникновения через пленку, в результате чего она разрушается. Катализация растворения алюминиевого катода хлорид-ионами также объясняется сильным замедлением процесса образования оксидной пленки, связанной с адсорбционным вытеснением кислорода.

Повышение концентрации сульфатов по отношению к постоянной концентрации хлоридов приводит к полному угнетению активизирующего действия хлорид-ионов на оксидную пленку. Повышение температуры воды препятствует формированию осадков на электродах, повышает скорость растворения пассивной пленки, уменьшает ее толщину и защитные свойства. Пленка становится рыхлой и свободно удаляется с поверхности алюминия. Значительно возрастает разрушение оксидной пленки в присутствии хлорид-ионов, сорбция которых на алюминии с повышением температуры увеличивается.

Растворение 1 г металлического алюминия эквивалентно введению в воду 12,3 г  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , растворение 1 г металлического железа – введению 4,8 г  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  или 4,9 г  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Метод электрокоагуляции обеспечивает высокий эффект удаления из воды загрязнений в виде взвесей (минерального, органического и биологического происхождения), коллоидов (соединений железа, веществ, обуславливающих цветность воды и т. д.), а также отдельных веществ, находящихся в молекулярном или ионном состояниях. Существенным преимуществом электрокоагуляции перед реагентными методами очистки воды является возможность отказа от строительства громоздких очистных сооружений, занимающих значительные производственные площади.

Электрокоагуляция позволяет осуществлять процесс очистки воды в компактных, автоматически действующих и легко обслуживаемых установках и особенно удобна для небольших автономных объектов (например на судах речного флота, в сельском хозяйстве, для малых поселков и т. д.). Преимущества метода электрокоагуляции позволяют использовать его для очистки технических, питьевых и сточных вод.

К числу недостатков метода следует отнести повышение расхода электроэнергии и металла на единицу обрабатываемой воды.

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс называется флотацией?
2. Какой вид флотации получил наибольшее распространение в промышленности?
3. Сущность пленочной флотации.
4. Что является необходимым условием обогащения полезных ископаемых с помощью масляной флотации?
5. Достоинства ионной флотации.
6. Какими явлениями сопровождается очистка сточных вод флотацией?
7. Охарактеризуйте три основных механизма столкновения частицы с пузырьком.
8. Какие способы флотационной обработки сточных вод выделяют по способу насыщения жидкости пузырьками воздуха?
9. От каких примесей очищают сточные воды с помощью пневматической флотации?
10. На какие типы подразделяется флотация с выделением воздуха из раствора в зависимости от того, как создается перенасыщенный раствор воздуха в воде?
11. Сущность электрофлотационного способа очистки сточных вод.
12. Какие три основных типа аппаратов, в которых применены различные способы организации взаимодействия фаз используются для осуществления процессов флотационной водоочистки?
13. Конструкционные особенности флотационных аппаратов.

## ГЛАВА 5

### СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ВОДООЧИСТКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Основным источником для промышленного и питьевого водоснабжения в большинстве регионов России являются поверхностные воды, на долю которых приходится до 80 % общего объема водозабора. Однако, в поверхностных водах во взвешенном состоянии содержатся нерастворимые и малорастворимые вещества: частицы глины, песка, карбонатных отложений, окислов железа, алюминия, высокомолекулярных органических примесей гумусового и техногенного происхождения, фито и зоопланктон и т. д., в связи с чем необходимо проводить водоочистку.

Традиционная технология подготовки питьевой воды включает два основных процесса [16]: удаление взвешенных и растворенных примесей и обеззараживание. При этом базовая схема очистки воды основана на коагулировании сернокислым алюминием с последующим отстаиванием, фильтрованием и обеззараживанием воды хлором. На энергетических предприятиях (ТЭС, АЭС, котельные) предварительная очистка (предочистка) воды поверхностных водоисточников производится аналогично подготовке питьевой воды с некоторыми отличиями. В частности, коагуляция или известкование с коагуляцией ведется в осветлителях со взвешенным шламовым слоем (типа ВТИ или ЦНИИ) с последующим фильтрованием в напорных фильтрах (типа ФОВ) с зернистой загрузкой (в основном гидроантрацит).

Технология очистки воды для нужд населения (хозяйственно-питьевая вода) и технология предочистки воды для нужд энерго- и промпредприятий имеют следующие общие недостатки:

– нестабильная работа осветлителей со взвешенным слоем (периодический вынос шламового осадка) из-за сложности их автоматизации по множеству сигналов (дозировка коагулянта и флокулянта, непрерывная продувка, поддержание шламового режима в зоне осветления, отсечка шламоуплотнителя и др.), а также чувствительность осветлителей к переменным нагрузкам, температуре и качеству исходной воды;

– напорные механические фильтры (типа ФОВ) и безнапорные скорые фильтры с высотой однослойной загрузки 900–1000 мм имеют низкую грязеемкость и не всегда обеспечивают требуемое качество осветленной воды, особенно по таким показателям, как присутствие железа, алюминия, взвешенных веществ и окисляемость;

– низкие скорости восходящего потока в осветлителях (2–3 м/ч), выпадение взвеси в горизонтальных отстойниках (1,2–1,8 м/ч) и фильтрование воды на механических фильтрах (на фильтрах ФОВ – до 10 м/ч, на скорых фильтрах до 6 м/ч) обуславливают низкую удельную производительность основного технологического оборудования и, как следствие, незначительные габаритные размеры данного оборудования и занимаемую ими площадь помещений. При этом необходимы высокие затраты на отопление и ремонтно-восстановительные работы.

В российских условиях, когда практически все промышленные предприятия энергетики, нефтегазопереработки, химии, металлургии и др., а также предприятия водоканалов, которые входят в систему ЖКХ были построены в 50–80-х годах прошлого столетия, физический износ основного технологического оборудования составляет 100–200 %. При этом на многих системах водоочистки из-за практики «остаточного финансирования» используется устаревшая и ненадежная арматура, нарушается нормативная регулярность замены фильтрующих материалов, практически отсутствуют приборы КИПиА, что приводит к дополнительным энергетическим потерям, высоким трудозатратам и значительным объемам сточных вод.

В последнее время руководство страны ставит вопрос о коренной модернизации предприятий с целью снижения издержек и ресурсов (сырье, энерго- и трудозатраты и др.), что позволит снизить себестоимость производимой продукции.

При модернизации системы водоподготовки необходимо учитывать следующие основные критерии выбора технологий и решений:

– надежность работы установки и гарантированный срок службы реконструированных или вновь построенных установок, который должен составлять не менее 30–40 лет, чтобы при окупаемости затраченных средств в течение 5–10 лет оставшиеся 25–30 лет установки приносили чистую прибыль;

– низкие эксплуатационные затраты, при минимизации капитальных затрат, должны обеспечить окупаемость в указанных пределах (5–10 лет). В противном случае привлечь инвестиции будет невозможно.

Финансирование из федерального или региональных бюджетов в условиях финансового кризиса весьма проблематично.

Следует отметить, что в последние 5 лет осуществлено строительство систем водоподготовки по современным технологиям (мембранные технологии, самопромывные зернистые фильтры и др.), в основном импортного производства со значительными капитальными и эксплуатационными затратами, которые финансировались либо из регионального

бюджета (Юго-Западная водопроводная станция, Москва), либо за счет инвестиций при строительстве крупных промышленных предприятий (энергетика, металлургия, химия), где затраты на водоподготовку составляли менее 5 % общей стоимости строительства.

В последнее время, особенно с появлением понятия «нанотехнологии», на российском рынке активно внедряется технология очистки воды с применением ультрафильтрационных полуволокнистых мембран [17, 18]. В то же время, согласно результатам пилотных испытаний, перед ультрафильтрацией целесообразно предусматривать комплекс предварительной стадии очистки воды для предотвращения интенсивного забивания мембран [19–22].

На Юго-Западной водопроводной станции с декабря 2006 г. находится в эксплуатации крупнейшая в Европе установка ультрафильтрации производительностью 250 тыс. м<sup>3</sup>/сут (10400 м<sup>3</sup>/ч). Для предварительной очистки воды реки Москва перед ультрафильтрацией используется следующая технологическая схема: первичное озонирование, коагулирование, корректировка рН, флокулирование, тонкослойное отстаивание, вторичное озонирование, обработка порошкообразным активированным углем, фильтрование через зернистую загрузку (антрацит, кварцевый песок) [18].

Наиболее сложным и требующим особого внимания процессом является ультрафильтрация. Восстановление работоспособности мембран осуществляется промывкой очищенной водой с периодичностью 1 раз в 1 ч. Такие частые промывки обуславливают образование больших объемов промывной воды (~12 % профильтрованной), поэтому предусмотрена схема подачи ее в начало технологической схемы для повторного использования. Периодически производится более глубокая очистка мембран с применением гипохлорита натрия, детергента и лимонной кислоты [23].

Важным фактором является содержание в воде солей жесткости (кальций и магний), которые оказывают негативное влияние на работу мембран за счет образования нерастворимых отложений на их поверхности при повышенных значениях рН. Для исключения этого явления поддерживается оптимальный диапазон рН путем дозирования в очищаемую воду серной кислоты (средняя доза кислоты – 12 мг/дм<sup>3</sup> при средней жесткости 4 мг-экв/дм<sup>3</sup>).

В очищаемой воде перед ультрафильтрацией также лимитируется мутность (не более 1,2 мг/дм<sup>3</sup>) и перманганатная окисляемость (не более 2 мг/д<sup>3</sup>).



Превышение данных показателей приводит к быстрому засорению мембран и снижению их производительности. В таких случаях обычная промывка водой не восстанавливает работоспособность мембран, возникает необходимость их частой химической промывки, сокращается срок службы мембран, требуется их внеплановая замена, что значительно повышает себестоимость воды. Во избежание этого при превышении показателя мутности (более  $1,2 \text{ мг/дм}^3$ ) и перманганатной окисляемости (свыше  $2,0 \text{ мг/дм}^3$ ) происходит автоматическое отключение мембран с целью их защиты от необратимого загрязнения.

Таким образом, для продолжительной работы ультрафильтрационных мембран требуется эффективная эксплуатация предыдущих стадий очистки воды, обеспечивающих гарантированно высокое качество очищенной воды перед подачей ее на доочистку мембранами.

В табл. 5.1 представлены данные по дополнительным эксплуатационным затратам при внедрении мембранных технологий в сравнении с традиционными.

Таблица 5.1

Сравнение доз реагентов на обработку воды реки Москва  
(средние дозы в 2007 г.)

Технология	Традиционная	Современная
Коагулянт, мг/л на $\text{Al}_2\text{O}_3$	6,7	8,4
Флокулянт (на основе полиакриламида) мг/л	0,04	0,72
Серная кислота, мг/л	–	12,4
Озон (суммарно), мг/л	–	2,2
Порошкообразный активированный уголь (суммарно), мг/л	0,3	9,6

При анализе капитальных затрат на Юго-Западной водопроводной станции (современная) [24] наибольшую удельную стоимость (50 %) составляют сооружения на базе высоких технологий – ультрафильтрационных мембран.

В то же время функциональное назначение данных мембран – тонкая доочистка воды, которая уже удовлетворяет требованиям СанПиН 2.1.4.107-0,1. К тому же удельные капитальные затраты составляют ~1200 евро на  $1 \text{ м}^3/\text{сут}$  производительности установки по приготовлению питьевой воды (или 1170 тыс. руб. на  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  производительности установки).

Применение современных зарубежных технологий для большинства городов России и промышленных предприятий представляется в настоящее время невозможным по причине высоких капитальных и эксплуатационных затрат.

В связи с этим можно вспомнить работы «классиков» водоподготовки и их последователей [25–27], которые рекомендовали следующие направления модернизации установок водоочистки:

- применение контактной коагуляции – коагулянт вводят в обрабатываемую воду непосредственно перед поступлением ее в зернистый фильтр, что приводит к улучшению процесса хлопьеобразования и соответственно к снижению расхода коагулянта;

- увеличению грязеемкости осветлительных фильтров за счет двух- или трехслойной загрузки фильтрующих материалов, что обеспечит высокое качество осветленной воды при низком расходе воды на собственные нужды (взрыхляющая промывка);

- использование напорной фильтрации, что позволит увеличить скорость фильтрования и продлить межпромывочный период за счет большего перепада давления.

Указанные рекомендации в отечественной практике в 60–80-е годы прошлого столетия не были широко реализованы из-за отсутствия доступных фильтрующих материалов (гранулометрический состав, механическая прочность и др.), надежных дренажно-распределительных устройств, арматуры и приборов КИПиА.

В настоящее время целесообразно пересмотреть стратегию строительства и реконструкции установок водоочистки с учетом минимизации капитальных затрат за счет использования отечественного оборудования, технологий и материалов, тем более что на это имеются необходимые предпосылки.

Так, за последние 10–15 лет в России налажено производство фильтрующих материалов (гидроантрацит, кварцевый песок и др.) различного гранулометрического состава, арматуры (поворотные затворы), приборов КИПиА и химического контроля, полимерных трубопроводов и материалов для химической защиты, не уступающих по качеству импортным аналогам и значительно меньшей стоимости.

Разработаны и внедрены современные технологии очистки воды, позволяющие при использовании отечественного оборудования и фильтрующих материалов в 1,5–2 раза снизить эксплуатационные затраты на производство осветленной воды.

В частности, на 20–30 ТЭС имеется положительный опыт установки тонкослойных модулей (ламели) в осветлителях со взвешенным слоем (разработка ВТИ и НИИ КВОВ), что позволяет обеспечить высокое качество осветленной воды и увеличить производительность предочистки. Стоимость установки таких модулей составляет 3–5 млн. руб. на каждый осветлитель (удельные капитальные затраты – 20–30 тыс. руб. на 1 м<sup>3</sup>/ч производительности ХВО). Хорошие результаты получены также при внедрении фильтров с плавающей загрузкой [28], обеспечивающих высокую эффективность на стадии предварительной очистки.

Получают широкое распространение дренажно-распределительные устройства для осветлительных напорных фильтров с использованием полипропиленовых колпачков производства фирмы KSH (Германия). Преимущества данных устройств:

- высокая химическая стойкость против практически любых агрессивных и окислительных реагентов;
- широкий диапазон щелей фильтрования (от 0,2 мм до 1,5 мм);
- простота монтажа и демонтажа при ремонтах;
- высокий срок службы (не менее 10 лет) и конкурентная цена.

На большинстве станций водоочистки используются традиционные фильтры типа ФОВ (рис. 5.1).

Технологический процесс осветления воды фильтрованием реализуется главным образом методом адгезионного объемного фильтрования в насыпных вертикальных осветлительных фильтрах. В контактных осветлителях организуют объемное фильтрование, при котором взвешенные частицы, проходя через слой фильтрующего материала, многократно изменяют направление и скорость движения в щелях между гранулами фильтрующего материала.

Применяются для удаления взвешенных примесей в количестве до 50 г/л. Если в исходной воде значения перманганатной окисляемости больше 8 мг/л или цветности больше 20 градусов платино-кобальтовой шкалы, необходимо предусмотреть предварительное коагулирование. Осуществляют пленочное фильтрование: при определенных условиях после некоторого начального периода фильтрующий материал обволакивается пленкой взвешенных веществ, на которой могут задерживаться частицы даже более мелкие, чем размер пор фильтрующего материала: коллоиды, мелкие бактерии, крупные вирусы.

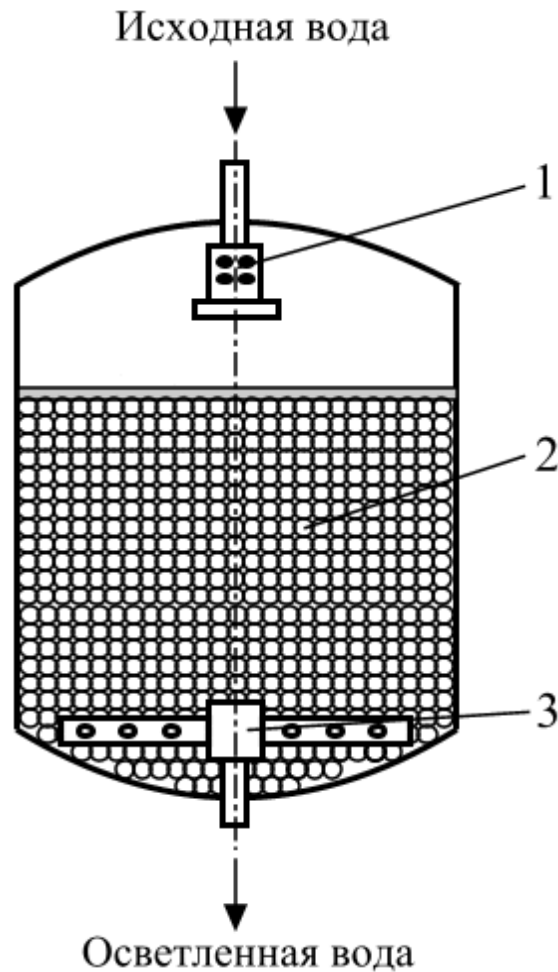


Рис. 5.1. Традиционный фильтр типа ФОВ:  
1 – верхний дренаж; 2 – гидроантрацит; 3 – нижний дренаж

Фильтр состоит из цилиндрического корпуса с приваренными к нему сферическими днищами. В промышленности выпускаются вертикальные однокамерные фильтры диаметрами 1,0; 1,4; 2,0; 2,6; 3,0 и 3,4 м. Внутри фильтра расположены слой фильтрующего материала и дренажно-распределительные устройства, предназначенные для равномерного распределения и сбора воды по площади поперечного сечения фильтра.

Номенклатура фильтров типа ФОВ приведена в табл. 5.2.

Верхнее дренажное устройство выполнено в виде отбойного щита, гасящего энергию потока поступающей воды, а нижнее состоит из коллектора с боковыми отводами, снабженными для отвода воды и в качестве препятствия для выноса фильтрующего материала специальными колпачками или щелевыми отверстиями шириной 0,4 мм.

## Номенклатура фильтров типа ФОВ

Номенклатура выпускаемых фильтров осветлительных вертикальных ФОВ и их характеристики					
Тип фильтра	Диаметр, мм	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Давление рабочее, не более МПа	Высота, не более мм	Масса, не более кг
ФОВ-1,0-0,6	1000	9	0,6	2750	700
ФОВ-1,4-0,6	1400	16	0,6	2900	1250
ФОВ-1,5-0,6	1500	18	0,6	2950	1250
ФОВ-2,0-0,6	2000	35	0,6	3430	2000
ФОВ-2,6-0,6	2600	60	0,6	3850	4100
ФОВ-3,0-0,6	3000	80	0,6	4250	4450
ФОВ-2469	610	3	1,0	1760	50
ФОВ-3072	765	5	1,0	1830	90
ФОВ-3672	915	7	1,0	1830	110
ФОВ-4278	1070	9,5	1,0	1990	140
ФОВ-4882	1220	12	1,0	2090	180
ФОВ-55120	1400	16	1,0	3050	220

Фильтрующий материал насыпных фильтров должен обладать надлежащим гранулометрическим составом, достаточной механической прочностью и химической стойкостью зерен. Таким требованиям удовлетворяют дробленый антрацит и кварцевый песок, но последний, растворяясь, обогащает воду соединениями кремния. Размеры зерен антрацита должны составлять 0,6–1,4 мм для однослойного фильтрования. В соответствии с требованиями механической прочности (истирание материала в период взрыхления) годовой износ фильтрующего материала не должен превышать 2,5 %.

Наиболее эффективны и экономичны многослойные фильтры, поскольку в них для увеличения грязеемкости и эффективности фильтрации загрузку составляют из материалов с различной плотностью и размером частиц: верхний слой состоит из крупных легких частиц, а ниже засыпан материал с мелкими и тяжелыми частицами. При нисходящем направлении фильтрования крупные загрязнения задерживаются в верхнем слое загрузки, а оставшиеся мелкие – в нижнем. Таким образом, очистка воды происходит во всем объеме загрузки. Полезная работа насыпного фильтра реализуется при скоростях фильтрования воды до 10 м/ч при предварительной ее обработке в осветлителях и 4–5 м/ч без предварительной обработки.

Во время работы осветлительных фильтров необходимо поддерживать постоянной скоростью фильтрования, контролировать перепад давления на слое фильтрующего материала и расход воды, отбирать пробы исходной воды и фильтрата для определения прозрачности. При повышении перепада давления до 0,1 МПа, содержания ГДП до 1 мг/дм<sup>3</sup> или по графику фильтр отключают на промывку для удаления задержанных ГДП. Основным этапом промывки является водная промывка потоком воды «снизу вверх». Интенсивный поток промывочной воды, поднимаясь, разрыхляет и переводит во взвешенное состояние весь фильтрующий слой (эффект псевдовитания), расширяющийся при этом на 40–50 %. Это дает возможность зернам фильтрующего материала свободно и хаотично перемещаться в потоке воды и при столкновении счищать прилипшие к ним частицы взвеси.

Интенсивность промывки должна обеспечивать вымывание осадков, но не вынос рабочих фракций фильтрующего материала. Значение интенсивности промывки зависит от типа материала, размера его зерен и обычно составляет для антрацита 10–12 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с), а для более тяжелого кварцевого песка 15–18 дм<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с). По окончании водной промывки первый мутный фильтрат в течение около 5 мин сбрасывается в бак, в котором собираются также воды взрыхления. В целях экономии промывочные воды вместе со шламом и первый фильтрат из бака равномерно в течение суток откачиваются насосом и подаются в осветлитель.

Водной промывке может предшествовать обработка фильтрующего материала сжатым воздухом после спуска водяной подушки или водо-воздушная промывка при одновременной подаче в нижнее дренажно-распределительное устройство сжатого воздуха и промывочной воды. Конкретизация режимов промывки осветлительных фильтров проводится в период их наладки. В механических фильтрах насыпного типа, предназначенных для очистки конденсата турбин и возвратных производственных конденсатов от продуктов коррозии Fe и Cu, используют в качестве загрузки катионит сульфуголь при температуре конденсата не выше 50 °С либо катионит марки КУ-2-8 при температуре до 100 °С. Скорость фильтрования конденсата принимается равной 30 м/ч для сульфуголя и 50 м/ч для катионита КУ-2-8.

Кроме того, в последнее время применяются механические фильтры с двухслойной фильтрующей загрузкой [29] (рис. 5.2).

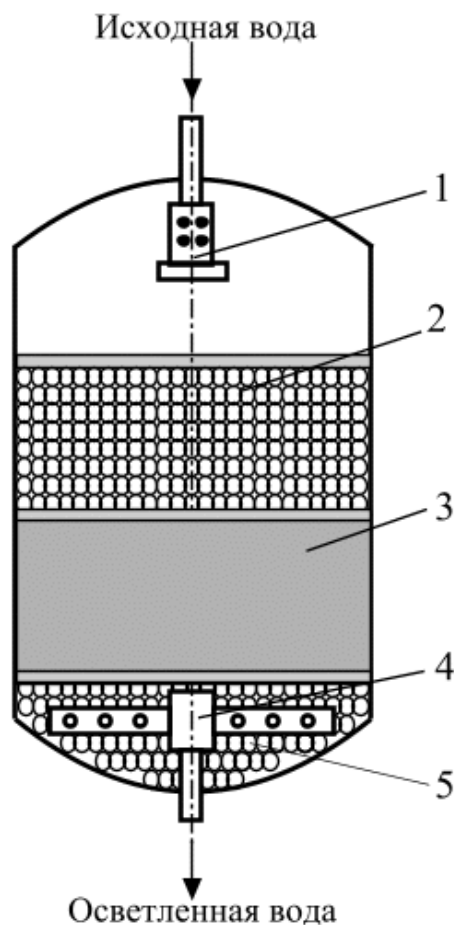


Рис. 5.2. Механический фильтр с двухслойной фильтрующей загрузкой:  
 1 – верхний дренаж; 2 – гидроантрацит; 3 – кварцевый песок; 4 – нижний дренаж;  
 5 – подстилочный слой

Они имеют высоту цилиндрической обечайки – 3000 мм (используются корпуса ионитных фильтров первой ступени типа ФИПа 1 или двухкамерных механических фильтров ФОВ-2К-3.4-0.6 с демонтажом внутренней перегородки). В качестве загрузки (снизу вверх) используются следующие фильтрующие материалы общей высотой 2000–2200 мм:

- подстилочный слой гравия (гранулометрический состав 2–5 мм) на высоту 300 мм (для защиты нижнего распределительного устройства);
- кварцевый песок (гранулометрический состав 0,6–1,2 мм) на высоту 600–1000 мм;
- гидроантрацит (гранулометрический состав 1,2–2,5 мм) на высоту 1000–1200 мм.

Неперемешивание фильтрующих слоев обеспечивается за счет значительной разницы их плотностей - кварцевый песок имеет плотность  $2,6 \text{ г/см}^3$ , гидроантрацит –  $1,6 \text{ г/см}^3$ .

Отличительной особенностью данных фильтров является увеличенная высота каждого слоя фильтрующей загрузки (до 1000–1200 мм) по сравнению с ранее используемой высотой 400–600 мм. На основании опыта пятилетней эксплуатации таких фильтров (ОАО «Химпром», г. Новочебоксарск; ОАО «Аммофос», г. Череповец) были получены следующие результаты:

- содержание взвешенных веществ в осветленной воде составляет менее 1 мг/дм<sup>3</sup>;
- коллоидный индекс SDI в осветленной воде составляет менее 30 ед.;
- производительность фильтров увеличивается практически в 2 раза (скорость фильтрования до 20 м/ч) по сравнению с производительностью традиционных фильтров ФОВ (скорость фильтрования до 10 м/ч);
- фильтровальный цикл (количество очищенной воды между промывками) увеличивается в 3–4 раза, что приводит к уменьшению потребления воды, т.е. расход воды на собственные нужды составляет 1–2 % (для фильтров ФОВ – 4–5 %).

Необходимо отметить, что наибольшая эффективность механических фильтров с двухслойной загрузкой отмечена при использовании их после осветлителей, работающих в режиме «чистой» коагуляции. В ХВО ТЭЦ ОАО «Аммофос» (ОАО «Фосагро») получены следующие результаты по осветлению коагулированной воды на двухслойных механических фильтрах:

- снижение содержания алюминия с 900–1000 до 20–70 мкг/дм<sup>3</sup>;
- снижение содержания окислов железа с 150–250 до 20–50 мкг/дм<sup>3</sup>;
- снижение перманганатной окисляемости с 5–7 до 3–5 мкг/дм<sup>3</sup>.

Полученный положительный эффект обусловлен тем, что проскочившие коагуляционные хлопьевидные частицы шлама после осветлителей задерживаются на верхнем слое крупнозернистого гидроантрацита и создают дополнительный сорбционный эффект очистки.

Капитальные затраты на модернизацию каждого фильтра составляют 2–4 млн. руб. (удельные капитальные затраты – 20–30 тыс. руб. на 1 м<sup>3</sup>/ч производительности ХВО).

Для вновь строящихся установок водоочистки может быть предложена схема (рис. 5.3) контактной коагуляции в напорных фильтрах с плавающей загрузкой (динамический осветлитель) с последующим доосветлением воды на механических фильтрах с двухслойной загрузкой (пат. РФ на ПМ № 75160).



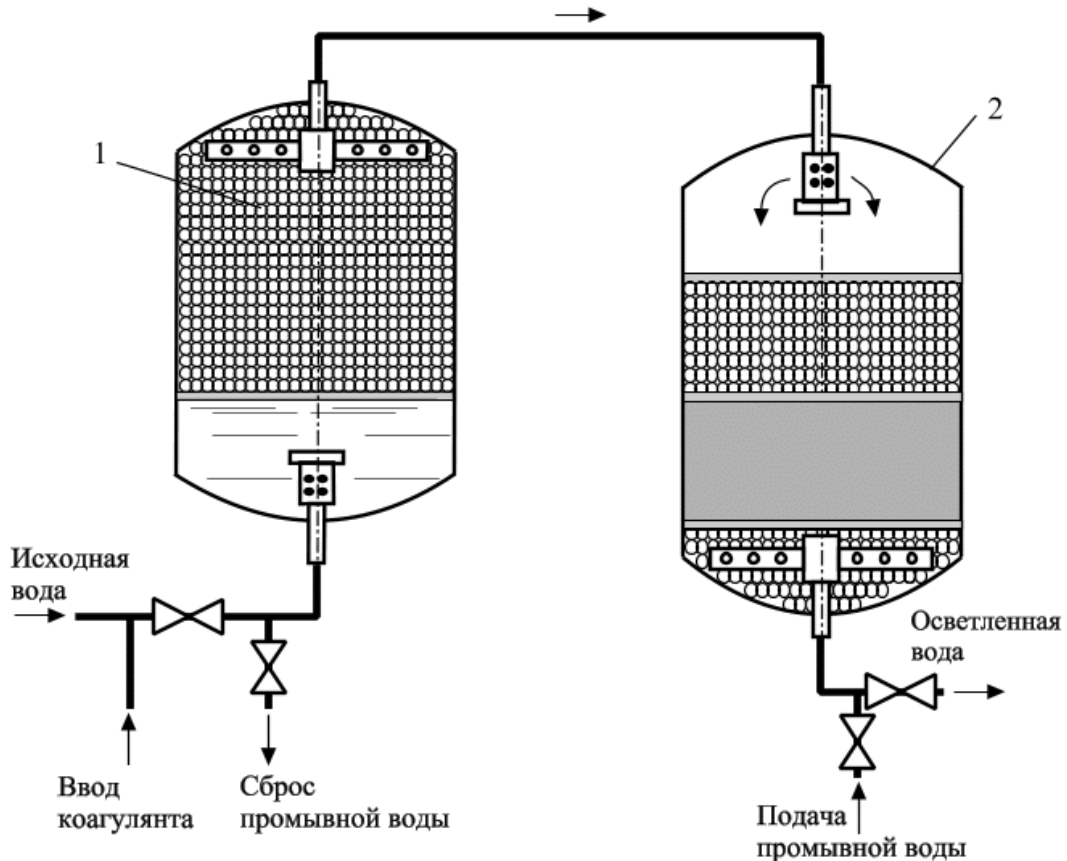


Рис. 5.3. Конструкция блока комбинированного осветления воды:  
1 – пенополистирол в фильтре (рис. 5.1); 2 – фильтр с двухслойной фильтрующей загрузкой (рис. 5.2)

В исходную воду вводится раствор коагулянта (сульфат алюминия или «Аква-Аурат») и флокулянта (полиакриламид или «Праестол») перед динамическим осветлителем (ДО), в котором используются для фильтрации гранулы размером 2–4 мм вспененного пенополистирола (крошка пенопласта). Такие гранулы имеют более высокие адгезионные электрокинетические свойства, чем песок или гидроантрацит, и их применение интенсифицирует процесс фильтрации. При коагуляции зерна загрузки и адсорбированные на них частицы служат центрами коагуляции – «затравкой». При этом резко ускоряется процесс роста хлопьев, которые образуются непосредственно на зернах загрузки, соответственно увеличивается эффект сорбции органических и механических загрязнений.

При очистке вода подается в динамический осветлитель (ДО) снизу через распределитель, фильтруется со скоростью 10–20 м/ч через слой плавающих шариков и, пройдя верхнее распределительное устройство, подается на доосветление на механические фильтры (МФ). При загрязнении фильтрующей загрузки в основном ДО производится

одновременная промывка ДО и МФ. Для этого промывная осветленная вода подается на механический фильтр снизу вверх и далее нисходящим потоком на ДО, сжижая плавающий слой. При кипении пенополистирольной загрузки происходит отмывка частиц от загрязнений, которые вместе с потоком воды удаляются из аппарата.

Результаты работы опытно-промышленной установки без дозирования реагентов в ОАО «Новокузнецкий алюминиевый завод» свидетельствуют, что эффективность очистки оборотной воды на блоке, состоящем из ДО и МФ, составляет:

- содержание взвешенных веществ менее  $1 \text{ мг/дм}^3$ ;
- снижение нефтепродуктов с 1,5 до 0,3–0,4  $\text{мг/дм}^3$ ;
- снижение окислов железа на 50–75 %.

При этом расход воды на собственные нужды блока ДО и МФ составляет не более 2 % производительности ХВО.

При внедрении технологии ДО-МФ при дозировании коагулянта (сульфат алюминия) и флокулянта (Праестол-650) для очистки воды водохранилища (Тверская обл.) были получены следующие результаты:

- снижение мутности с 10–15 до 0,5–1,0  $\text{мг/дм}^3$ ;
- снижение перманганатной окисляемости с 11–14 до 4–5  $\text{мг/дм}^3$ ;
- снижение окислов железа с 1000–200 до 200–250  $\text{мг/дм}^3$ .

Предварительные расчеты показывают, что капитальные затраты на строительство установки водоочистки производительностью  $1250 \text{ м}^3/\text{ч}$  (30 тыс.  $\text{м}^3/\text{сут.}$ ) составят 250–280 млн. руб., соответственно удельные капитальные затраты – 220–224 тыс. руб. на  $1 \text{ м}^3/\text{ч}$  производительности установки, что в 5–6 раз меньше капитальных затрат на строительство установок по зарубежным технологиям.

Срок службы основного оборудования (фильтры, насосы, арматура) составляет не менее 30 лет, фильтрующих материалов – не менее 10 лет, что обуславливает высокую надежность и длительный срок работы установки. Эксплуатация динамических осветлителей в режиме контактной коагуляции идентична эксплуатации скорых напорных фильтров, вследствие чего не требуется высокая квалификация персонала и уровень автоматизации.

За счет высоких скоростей фильтрования (в 3–4 раза выше, чем в традиционных технологиях) уменьшаются габаритные размеры необходимого оборудования, и соответственно занимаемая им площадь, что значительно снижает затраты на отопление помещения.

Благодаря напорной (закрытой) фильтрации уменьшается площадь санитарно-защитной зоны для питьевого водоснабжения и соответственно площадь отчуждения земель, что наиболее актуально для крупных городов.

### **5.1. Мембранные технологии на стадии предочистки исходной воды**

Принцип технологии мембранной очистки воды состоит в том, что образуется разделительный барьер, в виде мембранного фильтра, между двумя фазами одной жидкости [17].

*Основы мембранной технологии.* Мембранные процессы, широко применяемые в очистке воды, состоят в пропускании исходной воды через полупроницаемую мембрану.

Под влиянием приложенного давления молекулы воды некоторые растворенные вещества (размер которых меньше диаметра пор мембраны) проникают через мембрану, тогда как остальные примеси задерживаются. В результате прохождения через мембрану исходная вода разделяется на два потока: фильтрат (очищенная вода) и концентрат (сконцентрированный раствор примесей). Фильтрат подается потребителю, а концентрат сливается в дренаж.

Все примеси, размер которых превышает размер пор мембраны, механически не могут проникнуть через мембрану. Благодаря такой технологии, даже при значительном ухудшении параметров исходной воды, качество очищенной воды остается стабильно высоким.

Мембрана в отличие от «накопительных» систем очистки воды (активированный уголь, ионообменные смолы и др.) не накапливает примеси внутри себя, что исключает вероятность их попадания в очищенную воду.

Размер задерживаемых частиц определяется структурой мембраны, то есть размером ее пор. Мембранные процессы можно классифицировать по размерам задерживаемых частиц на следующие типы:

- микрофильтрационные мембраны,
- ультрафильтрационные мембраны,
- нанофильтрационные мембраны,
- обратноосмотические мембраны.

При переходе от микрофильтрации к обратному осмосу размер пор мембраны уменьшается и, следовательно, уменьшается минимальный размер задерживаемых частиц. При этом, чем меньше размер пор

мембраны, тем большее сопротивление она оказывает потоку, и тем большее давление требуется обеспечить для процесса фильтрации.

На рис. 5.4 представлена принципиальная схема мембранной технологии.

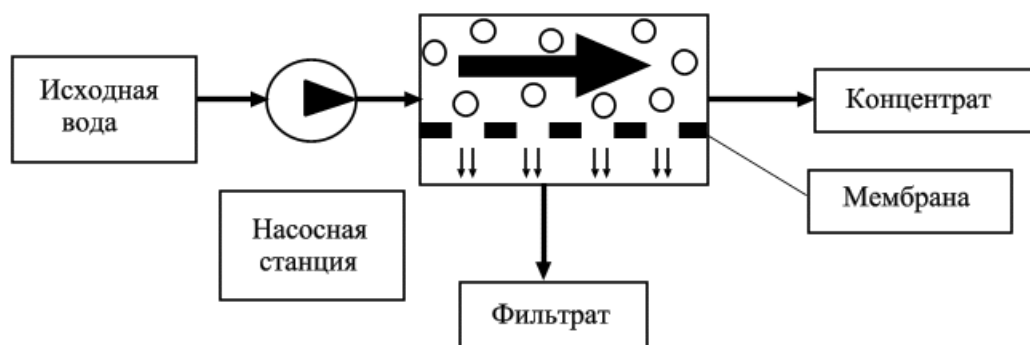


Рис. 5.4. Принципиальная схема мембранной технологии

При учете движущей силы, которая возникает между двумя фазами одной жидкости, в мембранной технологии очистки воды выделяют такие процессы как:

- микрофильтрация – мембранная технология очистки воды под действием давления, также применяемая для очистки сточных вод;

- ультрафильтрация – мембранная технология очистки воды, которая заключается в разделении потоков при действии давления, при котором важно разность молекулярной массы и молекулярного размера отходов;

- обратный осмос – мембранная технология очистки воды при помощи процесса селекции жидкости, которая проходит сквозь полупроницаемую мембрану, при действии на нее давления, которое превышает осмотическое давление в жидкости;

- диализ – мембранная технология очистки воды, которая применяется при учете разницы скорости проникания сквозь мембрану различных веществ, при наличии определенного градиента концентрации;

- электродиализ – мембранная технология очистки воды, которая применяется при прохождении ионов раствора сквозь мембрану под воздействием электрического поля, этот способ частично похож на биологическую очистку воды.

Чтобы получить воду высокого качества, обычно используют не один тип мембранной технологии очистки воды, а некоторые виды в комплексе. Так же возможно применение в комплексе с другими фильтрами, например с фильтрами, наполнителем для которых служит пиролюзит.

Также при применении мембранной технологии очистки воды, важен материал, из которого изготовлена мембрана, а также способы изготовления самой мембраны, которые потом могут отразиться на качестве очищенной воды.

Разделяют такие типы полупроницаемых мембран, которые используют для мембранной технологии очистки воды:

1. Полимерные мембраны, способы изготовления которых разделяют на:

- налив на гладкую поверхность и формирование в виде пленки расплава полимера;

- экструзия, образование с помощью выдавливания через фильеру расплава полимера;

- создание пленки с помощью распыления расплава полимера на поверхность;

- выщелачивание материала из пленки для осуществления процесса формирования пор;

- механическое, химическое, или механо-химическое изменение заготовок для полупроницаемых мембран.

2. Металлические мембраны, способы изготовления которых разделяют на:

- выливание полупроницаемой мембраны из расплава, или способом прокатки, вытяжки из расплава;

- использование методов порошковой металлургии;

- опрессовывание металлических волокон, в результате которых образуется войлок.

3. Керамические и углеродные мембраны, способы изготовления которых разделяют на:

- изготовление формовочных смесей с помощью технологии экструзии при использовании порошкообразных материалов;

- золь – использование технологии производства полупроницаемых мембран из водных растворов солей.

4. Стекланные мембраны, способы изготовления состоят в использовании технологии экструзии из расплава шихты.

5. Композиционные мембраны, способы изготовления которых разделяют на:

- использование технологии полимеризации мономера на поверхности различных материалов;

- использование технологии совмещения двух слоев при помощи склеивания;

– использование технологии формирования слоя вещества на поверхности другого;

– использование технологии осаждения раствора частиц материала на поверхность другого материала именуемой также – динамической мембраной.

На рис. 5.5 показан принцип действия различных типов мембран в соответствии с их назначением.

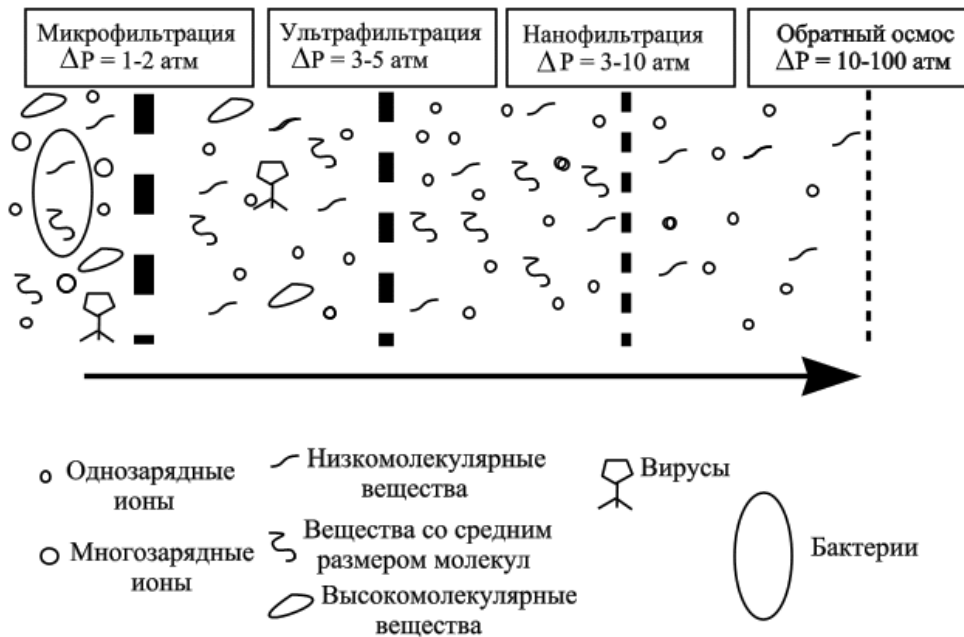


Рис. 5.5. Принцип действия различных типов мембран

*Микрофльтрационные мембраны* с размером пор 0,1–1,0 мкм задерживают мелкие взвеси и коллоидные частицы, определяемые как мутность. Как правило, они используются, когда есть необходимость в грубой очистке воды, или для предварительной подготовки воды перед более глубокой очисткой.

*Ультрафльтрационные мембраны* с размером пор от 0,01 до 0,1 мкм удаляют крупные органические молекулы (молекулярный вес больше 10 000), коллоидные частицы, бактерии и вирусы, не задерживая при этом растворенные соли. Такие мембраны применяются в промышленности и в быту и обеспечивают стабильно высокое качество очистки от вышеперечисленных примесей, не изменяя при этом минеральный состав воды.

*Нанофльтрационные мембраны* характеризуются размером пор от 0,001 до 0,01 мкм. Они задерживают органические соединения с молекулярной массой выше 300 и пропускают 15–90 % солей, в зависимости от структуры мембраны.

*Обратноосмотические мембраны* содержат самые узкие поры и потому являются самыми селективными. Они задерживают все бактерии и вирусы, большую часть растворенных солей и органических веществ (в том числе железо и гумусовые соединения, придающие воде цветность, и патогенные вещества). В среднем обратноосмотические мембраны задерживают 97–99 % всех растворенных веществ.

Такие мембраны используются во многих отраслях промышленности, где есть необходимость в получении воды высокого качества (розлив воды, производство алкогольных и безалкогольных напитков, пищевая промышленность, фармацевтика, электронная промышленность и т. д.).

Обратноосмотические мембраны широко применяются в быту - системы обратного осмоса позволяют получить чистойшую воду, удовлетворяющую СанПиН «Питьевая вода» и европейским стандартам качества для питьевого водопользования, а также всем требованиям для использования в бытовой технике, системе отопления и сантехнике.

Использование двухступенчатого обратного осмоса (вода дважды пропускается через обратноосмотические мембраны) позволяет получить дистиллированную и деминерализованную воду. Такие системы являются экономически выгодной альтернативой дистилляторам-испарителям и используются на многих производствах (гальваника, электроника и т. д.)

*Мембранная технология* получила широкое распространение, как в промышленном, так и в бытовом использовании благодаря ряду неоспоримых преимуществ:

- стабильно высокое качество очищенной воды;
- мембрана в отличие от накопительных водоочистных систем (активированный уголь, ионообменные смолы и др.) не накапливает внутри себя примеси, что исключает вероятность их попадания в очищенную воду;
- низкие эксплуатационные затраты;
- экологическая безопасность – отсутствие химических сбросов и реагентов;
- минимальное внимание со стороны пользователя;
- компактность.

В зависимости от выбора метода очистки выбирают соответствующую мембрану, которая и является фильтрующим элементом. Для выбора мембраны определяются с характеристиками:

1. *Задерживающая или разделяющая способность мембранного фильтра (селективность)*. Для качественной очистки требуется именно высокая величина селективности. Для каждого вещества эта величина

различная, но ее можно определить по каталогу, и обычно она обозначена точно, очень редко может быть ограничена как сверху, так и снизу. Также существуют методы расчета для каждого компонента отдельно.

2. *Удельная производительность мембранного фильтра.* Данная характеристика указывается в каталоге только по чистой воде в начальной точке, для определения реальной величины нужно провести эксперимент, но и из начальных параметров можно определить рабочий интервал. Как правило, он превышает показатели фильтров с наполнителем, даже если в качестве загрузочного материала использовать пиролокс.

3. *Механическая прочность мембранного фильтра.* Эта характеристика используется при использовании мембран, при наличии вибраций или механических воздействий (работа насоса, силы трения потока, деформации за счет турбулентности), а также при монтаже системы мембранной очистки воды. Также должна учитываться при выборе способа установки системы мембранной очистки воды.

4. *Химическая стойкость мембранного фильтра.* Характеристика, которая отвечает за устойчивость мембраны к воздействию агрессивных сред, с которыми предстоит столкнуться при очистке, например кислот, щелочей и других моющих компонентов. В особенности эта характеристика важна при разделении химически агрессивных смесей.

5. *Биологическая стойкость мембранного фильтра.* Характеристика указывает на защищенность мембраны от воздействия микроорганизмов, которые имеют особенность скапливаться на поверхности мембраны и разрастаться.

6. *Тепловая стойкость мембранного фильтра.* Характеристика, указывающая на стойкость к высоким температурам.

7. *Временной ресурс работы мембран мембранного фильтра.* Характеристика является производной предыдущих, в зависимости от культуры эксплуатации, режимов регенерации, консервации на период простоя, соблюдения технологических параметров. Производитель гарантирует определенный срок работы при соблюдении всех рекомендаций. Ресурс мембранных фильтров превосходит ресурс фильтров с загрузочным материалом, даже если в качестве последнего использовать пиролюзит.

8. *Санитарные требования мембранного фильтра.* При эксплуатации мембран в пищевой и медицинской промышленности обязательна сертификация предметом которой является – вымывание из мембраны компонентов, которые используются при изготовлении.



9. *Стабильность при хранении без эксплуатации мембранного фильтра.* Характеристика показывает срок хранения без эксплуатации, так как мембраны подвержены воздействию микроорганизмов, слипанию, высыханию, деформации. Рекомендуется хранить мембраны в герметичном пакете, а иногда даже в высушенном состоянии.

10. *Стоимость мембранного фильтра.* Характеристика показывает, насколько стоимость мембраны отражается на стоимости всей установки, и становится проблемной, если стоимость мембраны довольно высока. Например, для керамических мембран характеристика составляет около 40 %, что компенсируется только большим ресурсом работы.

11. *Утилизируемость мембранного фильтра.* Характеристика, указывающая на способы утилизации после полного использования системы мембранной очистки воды.

*По способам укладки мембран* все мембранные системы очистки воды разделяют на четыре основных типа:

- «фильтр-пресс» с плоскокамерными фильтрующими элементами;
- с трубчатыми фильтрующими элементами;
- с рулонными или спиральными фильтрующими элементами;
- с мембранами в виде полых волокон.

Данные мембранные фильтры различаются распределением потока, давлением, и капитальными и эксплуатационными расходами. При использовании метода микрофльтрации обычно используют системы мембранной очистки воды типа «фильтр-пресс» с плоскокамерными фильтрующими элементами, с применением насосов-дозаторов. Эти аппараты состоят из двух плоских мембран с определенным расстоянием между ними, которое заполнено дренажным материалом. Эти аппараты имеют невысокую производительность и применяются там, где потребность в воде невелика.

Для использования мембранной очистки воды методом ультрафльтрации применяют аппараты с трубчатыми фильтрующими элементами, способствующие умягчению воды. Эти аппараты состоят из пористых трубок диаметром 5–20 мм, с нанесенным на них мембранным материалом. К их недостаткам можно отнести высокие капитальные и эксплуатационные расходы.

В табл. 5.3 приведена классификация мембранных процессов.

Классификация мембранных процессов

Процесс	Диаметр пор, мкм	Рабочее давление, МПа	Мембранные элементы	
			Материал	Конфигурация
Микрофльтрация (MF)	0,08–2,0	0,007–0,1	Полипропилен, акрилонитрил, нейлон, фторопласт, керамика	Рулонные, полволоконные, плоскопараллельные, патронные, трубчатые
Ультрафльтрация (UF)	0,005–0,2	0,07–0,7	Ацетат целлюлозы, Ароматические полиамиды	Рулонные, плосковолоконные плоскопараллельные
Нанофльтрация (NF)	0,001–0,01	0,5–1	Ацетат целлюлозы, Ароматические полиамиды	Рулонные, полволоконные
Обратный осмос (RO)	0,0001–0,001	0,85–7	Ацетат целлюлозы, Ароматические полиамиды	Рулонные, полволоконные

Для систем, основанных на методе обратного осмоса, чаще всего используют системы рулонного типа – систему плоских рам и плит, которые свернуты в виде спирали. Из-за их громоздкости и сложности в производстве они применяются на больших предприятиях.

Также используются аппараты волоконного типа, который являет собой цилиндр заполненный пучком пористых волокон. Зачастую эти аппараты используются в опреснителях воды.

На рис. 5.6 показана установка с использованием мембранной технологии централизованном водоснабжении России. Первый опыт эксплуатации юго-западной водопроводной станции г. Москвы. На рис. 5.7, 5.8 представлены элементы установки.



Рис. 5.6. Юго-западная водопроводная станция г. Москвы.  
Ультрафильтрационная установка



Рис. 5.7. Внешний вид ультрафильтрационного элемента

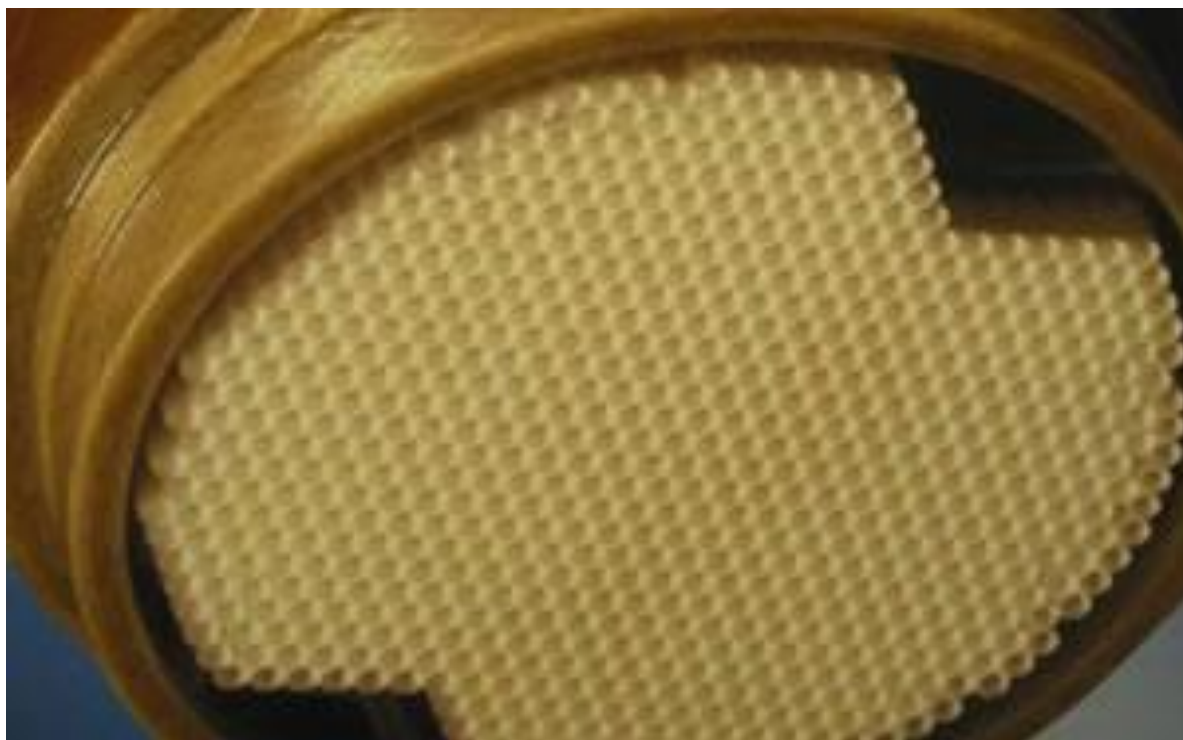


Рис. 5.8. Вид торца трубчатого мембранного элемента

## **5.2. Перспективы развития технологии водоочистки**

Качество подземных вод, используемых для водоснабжения, в основном соответствует нормативным требованиям, однако в последние годы их загрязнение заметно прогрессирует, в том числе нефтепродуктами, тяжелыми металлами, пестицидами и др., которые проникают со сточными водами в водоносные горизонты.

Основными причинами сложившегося положения, помимо продолжающегося загрязнения водоисточников, является неудовлетворительное состояние и повышенный износ сетей и сооружений водоснабжения из-за многолетнего недостаточного финансирования их развития.

### **5.2.1. Методы снижения концентрации остаточного алюминия при подготовке питьевой воды**

В настоящее время коагуляционная обработка воды сернокислым алюминием является основным процессом очистки природных поверхностных вод. Совершенствование гигиенической науки привело к необходимости ограничения в питьевой воде ряда веществ, появляющихся в результате ее реагентной обработки. К таким ингредиентам следует в первую

очередь отнести остаточный алюминий, появляющийся в воде в результате применения коагулянта. В соответствии с СанПиН 2.1.4.559–96, концентрация остаточного алюминия включена в группу токсикологических показателей качества воды и в настоящее время нормируется на уровне 0,5 мг/л. Это обуславливает необходимость тщательного выбора и регулирования режима коагуляционной обработки воды [30].

Остаточный алюминий в воде может находиться как во взвешенном состоянии, так и в растворенном. В первом случае его концентрация в значительной степени зависит от мутности очищенной воды, и ее уменьшение достигается путем интенсификации процессов осветления: повышения эффективности процессов смешения воды с реагентами и хлопьеобразования, улучшения работы отстойных и фильтровальных сооружений.

Остаточный алюминий может присутствовать в воде в виде растворенных комплексных соединений с органическими веществами. В этом случае необходимо стремиться к более глубокому снижению цветности и проведению процесса коагуляции при оптимальных значениях рН, что позволяет максимально перевести алюминий во взвешенное состояние, в котором он может быть легче изъят из воды в отстойниках и на фильтрах. При этом не исключено, что может потребоваться более глубокое, чем этого требует стандарт, снижение цветности, например, до 10–15 град. Не рекомендуется допускать увеличения цветности воды после коагуляции до 35 град, хотя это и предусмотрено СанПиН при согласовании с органами СЭС. Такое увеличение цветности практически всегда связано с резким повышением концентрации продуктов растворенного остаточного алюминия.

Если очищенная вода содержит алюминий в виде растворенных комплексов с органическими веществами в области рН 7,4–8, то с помощью увеличения дозы коагулянта можно добиться дополнительного снижения цветности и одновременно снижения рН, что будет способствовать уменьшению растворимости продуктов гидролиза сернокислого алюминия.

При очистке цветных вод с низкой исходной щелочностью необходимо тщательное дозирование коагулянта и подщелачивающего реагента (извести или соды) с целью глубокого снижения цветности при значениях рН 6,1–6,4, обеспечивающих минимальную растворимость гидроксидов алюминия. В некоторых случаях оказывается выгодным введение подщелачивающего реагента после коагулянта. При этом достигается более глубокое снижение цветности и, соответственно, концентрации растворенного алюминия или экономия коагулянта.

Иногда возможно вводить известь или соду двумя порциями: до и после коагулянта в конец смесителя или перед фильтрами. Первая порция обеспечивает проведение коагулирования гумусовых веществ при оптимальных низких значениях рН 4,5–6, а вторая способствует образованию осадка гидрооксида алюминия и улучшению выделения его из воды.

Более глубокое снижение цветности воды достигается повышением дозы коагулянта, что требует дополнительных затрат реагента. В некоторых случаях эта проблема может быть решена путем применения фракционированного коагулирования воды (введения коагулянта двумя-тремя порциями).

Применение флокулянта полиакриламида (ПАА) позволяет повысить прочность хлопьев и ускорить процесс их укрупнения, что важно для улучшения осаждения с коагулированной взвеси и фильтрования. ПАА рекомендуется вводить в воду после образования первичных частиц гидроксида и сорбции на них гумусовых веществ. Во многих случаях применение ПАА в дополнение к коагулянту уменьшает количество остаточного алюминия. При этом снижение концентрации остаточного алюминия достигается за счет уменьшения содержания в воде как взвешенных скоагулированных частиц, так и микрохлопьев, образующихся при обработке цветных вод. Однако использование ПАА не всегда дает желаемый эффект по снижению концентрации остаточного алюминия. Иногда для этой цели более эффективны катионные флокулянты.

При низкой щелочности обрабатываемой воды и низких температурах целесообразна замена сульфата алюминия оксихлоридом алюминия.

При использовании в технологии подготовки питьевой воды озона необходимо при выборе дозы первичного озонирования оценивать влияние этого процесса на последующую коагуляционную обработку воды. С одной стороны, предварительное окисление органических загрязнений позволяет снизить дозу коагулянта, а с другой стороны – приводит к образованию низкомолекулярных соединений, что способствует увеличению концентрации в воде остаточного алюминия. Это происходит потому, что большая часть окисленных органических соединений и после озонирования представляет собой макромолекулы (хотя и с меньшей молекулярной массой, чем исходные вещества), а снижение цветности воды достигается не в результате минерализации органических соединений, а за счет разрушения функциональных (хромофорных) групп гумусовых веществ. Образовавшиеся низкомолекулярные соединения при последующей коагуляции плохо сорбируются частицами гидроксида алюминия и оказывают на них стабилизирующее действие.

При решении проблемы снижения концентрации остаточного алюминия, при коагуляционной обработке воды в каждом конкретном случае, необходимо проведение комплекса технологических изысканий с использованием различных реагентов и способов их применения.

### **5.2.2. Новые конструкции камер хлопьеобразования гидравлического типа**

Процессы хлопьеобразования оказывают решающее влияние на эффективность очистки воды на стадиях ее отстаивания и фильтрации.

В России и странах СНГ используются в основном гидравлические камеры хлопьеобразования.

Основной недостаток этих аппаратов – низкая эффективность их работы, особенно при очистке маломутных цветных вод.

Проведенные исследования позволили разработать и испытать в производственных условиях принципиально иные конструкции камер, в которых процессы хлопьеобразования протекают в пространстве малых размеров с использованием адгезионных свойств ранее выпавшего осадка.

Разработано несколько модификаций камер хлопьеобразования: контактные (зернистые) камеры; тонкослойные камеры; тонкослойно-эжекционные камеры.

Контактные камеры хлопьеобразования наиболее эффективны при осветлении маломутных, цветных, слабоминерализованных вод с длительными периодами низких температур. При осветлении таких вод положительная роль зернистой среды заключается в том, что процессы хлопьеобразования протекают в замкнутом поровом пространстве, где значительно увеличивается вероятность столкновения частиц скоагулированной взвеси и их прилипания как друг к другу, так и к сформированным ранее агрегатам. В качестве зернистой контактной среды целесообразно использовать легкие плавающие материалы, которые обеспечивают отсутствие кольматации зернистого пространства, а также простоту их промывки обратным током воды. Такие камеры являются самопромывающимися, так как в процессе их работы, по мере накопления избыточного количества взвеси, под ее тяжестью происходит расширение зернистого слоя, и накопившиеся хлопья легко вымываются потоком осветляемой воды.

Поэтому потери напора в зернистом слое не превышают 3–5 см, что гарантирует их стабильную эксплуатацию.

Впервые контактная плавающая загрузка была использована при интенсификации работы камеры хлопьеобразования водоворотного типа, встроенной в вертикальный тонкослойный отстойник на станции водоочистки г. Ухты (рис. 5.9).

Для получения зернистой среды использовались плиты пенопласта, которые нарезались на гранулы требуемого размера. Крупность загрузки составляла 30–40 мм, высота слоя – 0,85 м. Сравнительные результаты работы водоворотных и контактной камер показали, что при одинаковой производительности качество отстоянной воды во втором случае характеризовалось более низкими значениями мутности, цветности, остаточного алюминия. Увеличение удельных нагрузок на реконструированную камеру до 1,5–2 раз выравнивало эти показатели.

Высокая эффективность контактных камер хлопьеобразования была подтверждена также результатами их эксплуатации на станциях водоочистки в г. Даугавпилс, Северодвинск, пос. Пролетарский Новгородской обл. и ряде других (рис. 5.10).

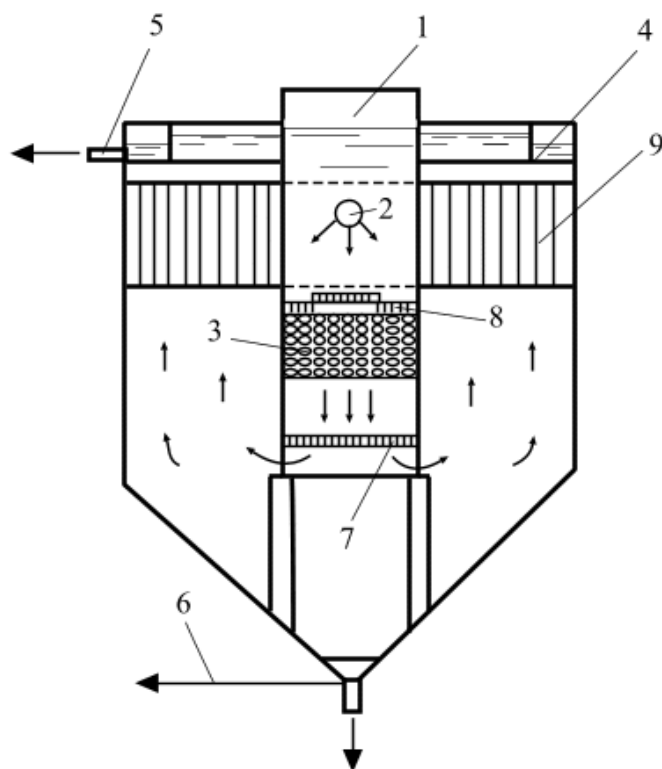


Рис. 5.9. Вертикальный тонкослойный отстойник с контактной камерой хлопьеобразования:

- 1 – камера хлопьеобразования; 2 – подача исходной воды;  
 3 – контактная плавающая загрузка; 4 – сборный лоток; 5 – отвод осветленной воды;  
 6 – сбор осадка; 7, 8 – нижняя и верхняя поддерживающие решетки, соответственно;  
 9 – тонкослойные сотоблоки



Для интенсификации работы сооружений, в которых процессы хлопьеобразования осуществляются в слое взвешенного осадка, Могут использоваться тонкослойные камеры хлопьеобразования. Их отличительной особенностью являются тонкослойные элементы, установленные в зоне взвешенного осадка и способствующие повышению ее концентрации и увеличению гидравлической крупности.

По сравнению с традиционной флокуляцией в объеме, слой взвешенного осадка, образованный в замкнутом пространстве тонкослойных элементов, характеризуется значительно более высокими концентрациями взвешенного слоя и его устойчивостью по отношению к изменениям качества исходной воды и нагрузки на сооружения.

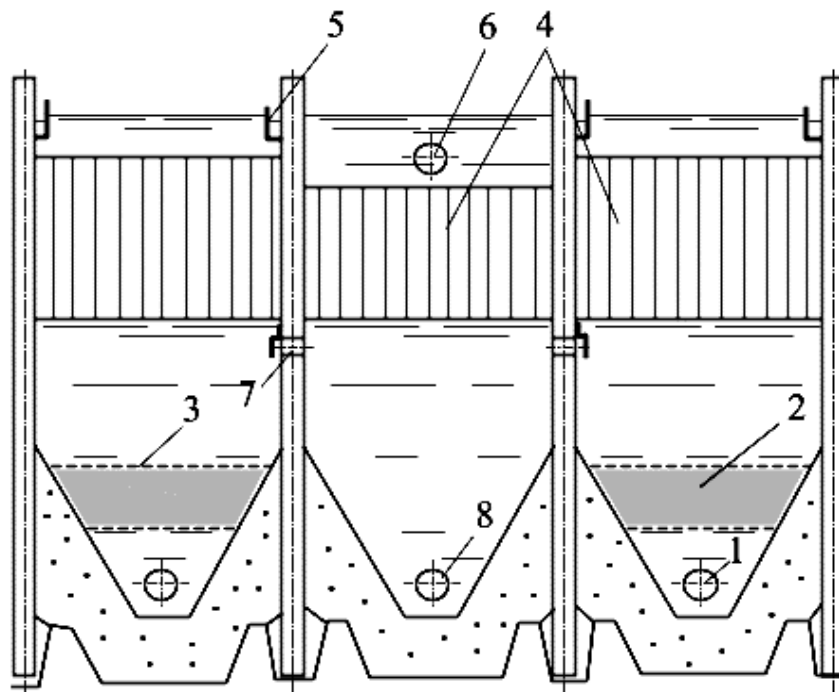


Рис. 5.10. Тонкослойный осветлитель с контактной камерой хлопьеобразования:  
 1 – подача исходной воды; 2 – плавающая зернистая загрузка;  
 3 – решетка, задерживающая загрузку от всплывания; 4 – тонкослойные блоки;  
 5 – сборные желоба; 6 – сбор воды из шламоуплотнителя;  
 7 – осадкоотводящие окна; 8 – трубы для удаления осадка

В качестве тонкослойных элементов могут использоваться сотоблоки из полиэтиленовой пленки, выпуск которых в настоящее время организован в необходимом количестве. В отличие от сотоблоков, используемых в отстойниках, их длина в наиболее сложных случаях может быть увеличена с 0,7–1,0 до 1,5 м, а угол наклона к горизонту воды должен составлять 70–75°, что обеспечивает более эффективное сползание и рециркуляцию осадка.

При определенных показателях качества воды, когда для эффективного хлопьеобразования требуется введение дополнительной твердой фазы, могут использоваться тонкослойно-эжекционные (рециркуляционные) камеры хлопьеобразования (рис. 5.11).

Принцип их работы отличается тем, что под тонкослойными блоками устанавливаются определенным образом низконапорные эжекционные рециркуляторы, через которые в камеры подается исходная вода.

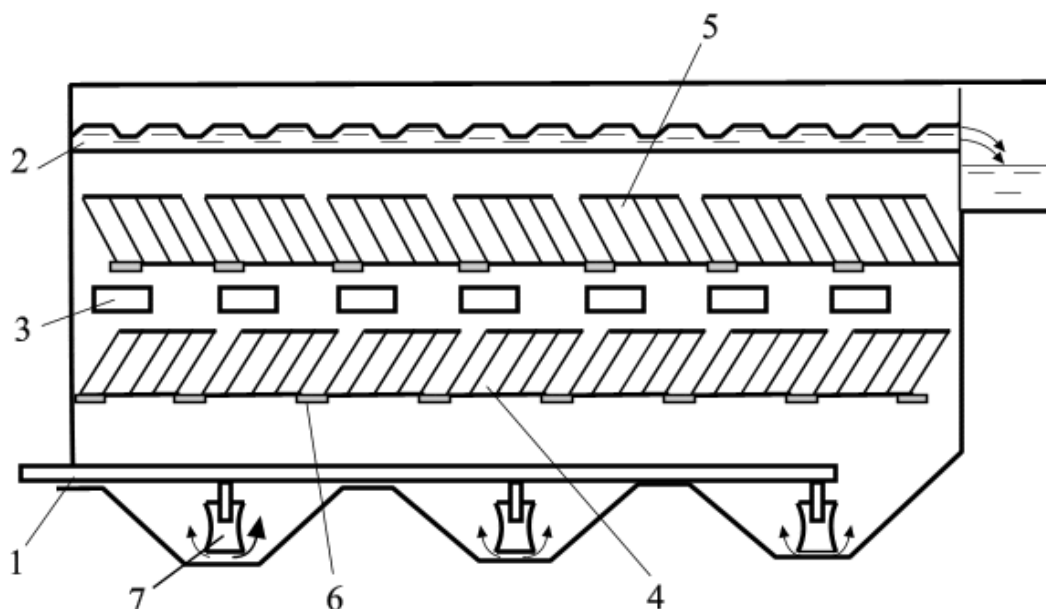


Рис. 5.11. Схема оборудования осветлителя тонкослойными блоками и рециркуляторами:

- 1 – подача исходной воды; 2 – сбор осветленной воды;  
 3 – шламоотводящие окна; 4 – тонкослойные блоки в зоне взвешенного осадка (хлопьеобразующие); 5 – тонкослойные блоки в зоне осветления (осветлительные);  
 6 – поперечные опоры под блоки; 7 – эжекторы

Они располагаются таким образом, что одновременно через них подсасывается (без разрушения структурных свойств) взвесь, выпавшая из тонкослойных элементов, и осадок, осевший на дно камеры.

Осадок, частично возвращенный в поток обрабатываемой воды, способствует увеличению в 2–3 раза массовой и объемной концентрации взвешенного слоя. Тонкослойно-эжекционные камеры хлопьеобразования использованы в проектах модернизации станций водоочистки г. Кстово, Павлово-на-Оке и др.

Наиболее широко эти камеры применяются в модернизированных установках заводского изготовления «Струя» и особенно «Влага», разработанных в НИИ КВОВ. Установки «Влага» предназначены для станций небольшой производительности (НПО – 5000 м<sup>3</sup>/сут) и являются

компактными, высоконагружаемыми комплексами. Использование для проведения процессов хлопьеобразования тонкослойно-эжекционных камер обеспечивает высокую эффективность работы этих установок при различных типах водоисточников.

### **5.2.3. Использование тонкослойных сотоблоков из полиэтиленовой пленки для повышения эффективности работы отстойников и осветлителей с взвешенным осадком**

В современной практике водоподготовки и очистки сточных вод все более широкое применение находят тонкослойные отстойные сооружения, в которых процессы осаждения взвеси протекают в слоях небольшой глубины, не превышающей 0,03–0,1 м.

Высокая эффективность процесса тонкослойного осаждения была теоретически показана, а затем экспериментально подтверждена многими исследователями еще в 20–40-х годах нашего столетия.

Однако, только развитие промышленности пластмасс позволило широко использовать их для создания тонкослойных блоков. В наиболее развитых странах отстойники с тонкослойными элементами из полимерных материалов стали использоваться в технологии обработки природных и сточных вод в середине 60-х годов.

Предварительный анализ показал, что тонкослойные отстойники характеризуются повышенной материалоемкостью, и основное влияние на стоимость блоков оказывает расход материалов на изготовление тонкослойных элементов, определяемый в основном их толщиной. В связи с этим более экономичными, по сравнению с полочными конструкциями из листовых материалов (полиэтилена, винипласта, стеклопластика, асбестоцемента и др.), являются ячеистые конструкции блоков при условии выполнения их из тонких материалов. Анализ свойств пригодных для изготовления тонкослойных блоков полимеров позволил сделать вывод, что по физико-химическим показателям, химической и бактериологической стойкости, долговечности наиболее подходящими являются мягкие полимерные пленки, в частности наиболее дешевая и распространенная из них полиэтиленовая пленка.

Из имеющихся методов сварки наиболее простым и надежным является метод экструдированной присадки, соединяющий слои пленки между собой с помощью расплавленного полимера, выдавливаемого в виде прутка. Этот метод сварки обеспечивает высокое качество сварного шва, стабильность режима и высокую производительность труда.

К достоинствам экструзионного метода сварки следует отнести также возможность получения дополнительного каркаса, создаваемого экструдированной присадкой и увеличивающего прочность и жесткость конструкции.

Исследования показали, что достаточно прочная и надежная конструкция тонкослойного блока может быть изготовлена из пленки, толщиной не менее 150–200 мм.

Разработанная последовательность соединения полиэтиленовой пленки в сотовую конструкцию позволяет изготавливать сотоблоки любого размера, в зависимости от параметров отстойного сооружения.

Это особенно важно в связи с тем, что при монтаже тонкослойных модулей требуется их полная герметизация как между собой, так и между модулем и стенками сооружения. Кроме того, при изготовлении сотоблоков полиэтиленовая пленка сваривается в такой последовательности, чтобы обеспечить его наибольшую пространственную устойчивость и возможность растягивать на рамы только в четырех крайних ячейках.

Исходя из прочностных характеристик полиэтиленовой пленки, а также условий ее сварки, размеры в плане одного отстойного элемента (ячейки) были приняты: 0,05 м (высота) и 0,5–0,20 м (ширина). Длина отстойных элементов определяется гидравлической крупностью осаждающейся взвеси, а также требованиями к качеству отстойной воды и может составлять 0,7–1,5 м. Оптимальными размерами в плане всего сотоблока, с точки зрения удобства их растяжения и монтажа, а также габаритов типовых отстойных сооружений, считаем от 1,0×1,0 м до 1,5×1,5 м.

Тонкослойные сотоблоки из полиэтиленовой пленки были установлены в вертикальные и горизонтальные отстойники, а также осветлители со слоем взвешенного осадка различных конструкций, расположенные на станциях водоочистки в городах Ухта, Северодвинск, Киров, Даугавпилс, Новгород, Тбилиси, поселках Пролетарский (Новгородской обл.), Ленино (Крымской обл.) и др.

Многолетние испытания работы указанных выше тонкослойных сооружений подтвердили высокую эффективность метода осаждения взвеси в слоях небольшой высоты. Была также подтверждена прочность, надежность и долговечность разработанной конструкции блоков, простота их монтажа и эксплуатации. Оборудование отстойных сооружений тонкослойными блоками позволяет в 1,5–2,0 раза повысить их производительность, улучшить качество осветления воды, обеспечить более стабильную работу сооружений в условиях изменения качества исходной воды. В то же время, для тонкослойных отстойных сооружений необходима эффективная работа камер хлопьеобразования. Только при условии подачи

в тонкослойные элементы, сформировавшихся с достаточной гидравлической крупностью хлопьев, возможно их тонкослойное осаждение при скоростях, в несколько раз превышающих скорости традиционных отстойников.

Для улучшения гидродинамических условий хлопьеобразования могут использоваться зернистые контактные загрузки, установка в камерах хлопьеобразования тонкослойных блоков, а также тонкослойно-эжекционные камеры хлопьеобразования. Кроме того, для качественной работы тонкослойных блоков важно обеспечить равномерный сбор воды по всей отстойной площади, а также использовать надежные системы удаления осадка с днищ отстойников и осветлителей.

Выполнение этих условий показывает, что оборудование отстойных сооружений тонкослойными сотоблоками позволяет в 1,4–1,6 раза увеличить их производительность, улучшить качество очистки воды на стадии ее отстаивания и фильтрации, снизить на 1–2 % расход воды на собственные нужды водоочистных станций.

#### **5.2.4. Рециркуляция осадка – метод повышения эффективности работы водоочистных сооружений**

Как известно, работа традиционных сооружений первой ступени очистки (отстойников, осветлителей с взвешенным осадком) при очистке маломутных вод со средней или высокой цветностью недостаточно надежна и эффективна. В первую очередь это обусловлено вялым протеканием процесса коагуляции из-за невысокой концентрации твердой фазы в исходной воде.

Наиболее рациональный путь повышения концентрации твердой фазы – использование рециркуляции ранее образовавшегося в сооружениях осадка, который при введении в очищаемую воду играет роль дополнительных центров хлопьеобразования. Эти центры смещают часть процесса коагуляции от пространственного структурообразования к автокаталитической коагуляции, сорбции и адгезии. В результате, растут прочность и плотность вновь образующихся хлопьев и, соответственно, их гидравлическая крупность.

Данные предпосылки легли в основу нового метода рециркуляции осадка, в котором для снижения степени диспергирования хлопьев рециркуляцию осуществляют по «внутреннему контуру», т. е. без вывода основной части хлопьев из сооружения.

Этот метод реализован в разработанных ЛНИИ АКХ конструкциях осветлителей – рециркуляторов (рис. 5.12) и камер хлопьеобразования зашламленного типа с рециркулируемым слоем осадка. Были предложены разнообразные (в том числе и малогабаритные) аппараты, позволяющие с относительно невысокими затратами реконструировать практически любые типы используемых сооружений первой ступени очистки.

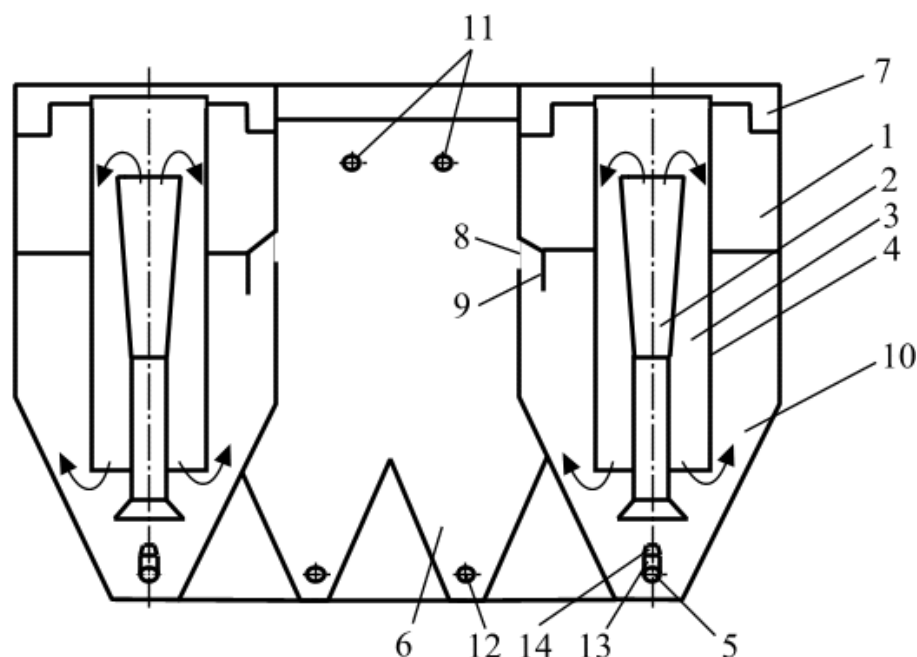


Рис. 5.12. Осветлитель-рециркулятор:

- 1 – рабочая камера; 2 – смеситель; 3 – камера хлопьеобразования;
- 4 – направляющий аппарат; 5 – распределительная трубка;
- 6 – осадкоуплотнитель; 7 – лоток; 8 – окна; 9 – защитный козырек;
- 10 – слой взвешенного осадка; 11 – трубы для перепускания взвешенного осадка;
- 12 – трубы для выпуска уплотненного осадка;
- 13 – патрубков; 14 – сопло

Осветлители-рециркуляторы защищены патентом РФ № 1017383, а камеры хлопьеобразования с рециркулируемым слоем осадка – патентом РФ № 1575544.

Все эти сооружения широко применяются в отечественной практике на водоочистных станциях в гг. Костроме, Новгороде, Архангельске, Череповце, Выборге, Кирово-Чепецке и многих других.

Во всех случаях работа сооружений с рециркулируемым осадком характеризуется эффективностью, стабильностью и надежностью.

Благодаря рециркуляции производительность сооружений увеличивалась от 30 до 60 %. Одновременно было установлено, что за счет рециркуляции осадка существенно повышалась барьерная роль

сооружений первой ступени очистки в отношении планктона, составляя (в зависимости от вида планктона) от 90 до 100 %.

Таким образом, рециркуляция осадка на сооружениях первой ступени очистки обеспечивает возможность не только существенно повысить качество очистки воды и производительность сооружений в целом, но и позволяет с минимальными затратами утилизировать промывные воды фильтровальных сооружений, а также с наибольшей полнотой использовать при необходимости порошкообразные сорбенты.

### **5.2.5. Технология удаления загрязнений природного и антропогенного происхождения озонированием и сорбцией на активных углях**

В связи с возрастающим загрязнением водных объектов, используемых в качестве источников водоснабжения населения, в мировой практике расширяется применение озона и активных углей для подготовки воды питьевого качества. В настоящее время более 1000 водопроводных станций в Европе, особенно во Франции, Германии, Швейцарии и Финляндии, применяют озонирование как составляющую ступень в технологическом процессе очистки воды.

В странах СНГ озонирование по ряду причин применяется в основном лишь на некоторых водопроводных станциях крупных городов (Москва, Нижний Новгород, Киев, Минск) с использованием зарубежного оборудования (французская фирма «Треплигаз»). Имеются отдельные небольшие объекты (преимущественно для очистки производственных сточных вод), плавательные бассейны и другие, где работает отечественное оборудование. Впервые в России осуществлен монтаж озонаторного оборудования большой производительности (120 кг/ч) производства завода «Курганхиммаш» на курганской водопроводной станции.

Сорбционная очистка воды нашла широкое применение в странах Европы и Америки более чем на 500 водопроводных станциях.

Сброс неочищенных или недостаточно очищенных бытовых и промышленных сточных вод, а также смыв с сельскохозяйственных территорий вод, содержащих пестициды и другие ядохимикаты, приводят к ухудшению воды в источниках водоснабжения. Состав вод поверхностных водоемов вблизи крупных городов характеризуется содержанием в них повышенных концентраций фенолов, нефтепродуктов, хлорорганических соединений, аммонийного и нитритного азота и пр. Содержание их в водоисточниках нередко в десятки и сотни раз превышает предельно допустимые концентрации (ПДК) по санитарно-гигиеническим показателям.

На территории России санитарное состояние рек Волги, Оки, Камы, Томи, а также большинства водоемов Урала и Западной Сибири является неудовлетворительным. Вследствие этого в городах, использующих эти водные объекты в качестве источников водоснабжения, складывается напряженная ситуация с обеспечением населения водой питьевого качества.

В таких условиях барьерная роль очистных сооружений по отношению к химическим загрязнениям крайне мала, и многие действующие водоочистные станции не могут обеспечить требований стандарта по этим загрязнениям.

Лабораторией технологии и оборудования очистки природных вод НИИ КВОВ за последнее время проведены обширные и детальные исследования по определению эффективности озонирования воды в сочетании с сорбцией на активных углях в различных регионах России (гг. Владимир, Таганрог, Рязань, Кемерово, Новокузнецк, Ярославль, Оренбург и др.). Было показано, что без применения этих методов получить воду требуемого качества из загрязненных водоисточников практически невозможно.

В зависимости от качественного и количественного состава загрязнений водоисточника возможны различные варианты применения озона в технологической схеме очистки воды.

Возможны следующие варианты введения озона.

*Одноступенчатое озонирование:* использование озона на стадии предварительного окисления воды или после коагуляционной ее очистки перед песчаными или угольными фильтрами.

Первичное озонирование (предозонирование) проводится с целью окисления легкоокисляемых органических и неорганических загрязнений, улучшения процесса коагулирования, а также для частичного обеззараживания воды. В этом случае исходная вода обрабатывается небольшими дозами озона.

*Двухступенчатое озонирование:* предварительное озонирование и озонирование после коагуляционной обработки воды.

Вторичное озонирование воды позволяет осуществлять дальнейшее, более глубокое окисление оставшихся загрязнений. Оно повышает эффективность сорбционной очистки и продлевает срок службы активного угля до регенерации, в данном случае озон вводится перед песчаными или угольными фильтрами.

*Трехступенчатое озонирование:* предварительное озонирование после коагуляционной обработки и озонирование после полной очистки воды.



Заключительное озонирование очищенной воды (постозонирование) обеспечивает полное обеззараживание и улучшает органолептические показатели воды.

Сорбционная очистка воды применяется для повышения глубины очистки от органических загрязнений и удаления продуктов озонлиза на заключительном этапе обработки воды.

Одно озонирование, как и одна сорбционная очистка, не всегда позволяет решить поставленную задачу повышения эффективности очистки воды. Поэтому, в большинстве случаев предпочтительно совместное применение озона и сорбции на активных углях в дополнение к традиционным схемам очистки.

Однако на практике встречаются случаи, когда озонирование может привести и к ухудшению процессов очистки воды.

Так, при озонировании некоторых вод дозы озона существенно влияют на последующий процесс коагулирования, т. е. существует достаточно узкий диапазон их оптимальных значений, меньше которого озонирование неэффективно, а при больших дозах отмечается появление взвеси в фильтрованной воде и повышается концентрация остаточного алюминия.

В ряде случаев озонирование воды может привести к повышению концентрации некоторых химических загрязнений, например фенолов, которые могут образовываться в результате неполного окисления ароматических соединений, присутствующих в воде.

Известно также, что в процессе озонирования воды возможно образование побочных продуктов, из которых наиболее представительным является формальдегид. Однако при последующей сорбционной очистке на угольных фильтрах содержание формальдегида существенно уменьшается.

Озон обладает высокой бактерицидной способностью, однако следует также иметь в виду, что использовать его в качестве единственного обеззараживающего реагента невозможно, т. к. он не обладает пролонгирующим бактерицидным действием. Кроме того, при озонировании воды многие органические загрязнения подвергаются деструкции, в результате чего увеличивается количество биоразлагаемых соединений, это создает благоприятные условия для повторного бактериального загрязнения очищенной воды в водопроводной сети.

В связи с этим во всех случаях применения озона необходимо заключительное хлорирование воды дозами, обеспечивающими содержание в воде остаточного хлора на уровне 0,3–0,5 мг/л, что гарантирует полный обеззараживающий эффект.

Решение вопроса целесообразности и эффективности озонирования и очистки воды на активных углях возможно только по результатам проведения предпроектных технологических исследований, которые позволят определить места ввода озона в общей технологической схеме и оценить его влияние на основные процессы очистки воды, применяемые на данной водоочистной станции.

Кроме того, в ходе таких исследований и только по их результатам можно установить оптимальные дозы озона в характерные периоды года, определить расчетно-конструктивные параметры метода окислительно-сорбционной очистки воды, а именно: коэффициент использования озона, время контакта озоновоздушной смеси с обрабатываемой водой, варианты использования сорбционных фильтров с выбором наиболее эффективных марок активных углей; уточнить скорость фильтрования, время до реактивации угольной загрузки и режим реактивации с определением его аппаратного оформления, а также другие технологические и технико-экономические вопросы применения озона и активных углей на водоочистных станциях.

Таким образом, оптимальные условия применения методов глубокой очистки воды – озонирования и сорбции на активных углях – определяются только путем проведения специальных исследований на каждом конкретном объекте.

На основании проведенных работ установлено следующее.

1. Получить воду питьевого качества из водоисточников с повышенными концентрациями химических загрязнений антропогенного происхождения в большинстве случаев без применения озона не удастся.

2. Все чаще возникает необходимость применения для очистки воды сорбционных фильтров с активным углем. Целесообразным является применение сорбционных фильтров после осветлительных песчаных фильтров. Совместное применение озона и последующей сорбции в дополнение к существующим технологическим методам позволяет получить высококачественную безопасную для здоровья населения питьевую воду. При этом существенно увеличивается межреаквационный период работы угольных фильтров.

3. Во всех случаях применения озона требуется заключительное хлорирование перед резервуаром чистой воды для обеззараживания воды и обеспечения бактерицидного действия в водопроводной сети.

4. Для решения вопросов о целесообразности применения специальных методов очистки и их эффективности необходимо проведение технологических изысканий на воде конкретного водоисточника с учетом технологии водоподготовки на данной водопроводной станции.

### 5.2.6. Реактивация активных углей

Зарубежный и отечественный опыт показал, что во многих случаях использования природных вод целесообразно применять сорбционный способ очистки на активных углях.

Учитывая высокие цены на активный уголь, актуальным является вопрос реактивации угля. Поэтому влияние технико-экономических характеристик реактивации на себестоимость сорбционной очистки воды особенно велико.

Существует несколько методов реактивации активных углей. Наиболее распространенными методами реактивации являются химический и термический:

– химический метод – обработка сорбента растворами кислот (соляной, серной), щелочей или солей. Поглотительная способность углей при химической обработке восстанавливается не более чем на 50–60 %, поэтому для более полного восстановления адсорбционных свойств активных углей химическую реактивацию комбинируют с термической;

– термическая реактивация – обработка углей при высоких температурах (800–950 °С) в атмосфере перегретого водяного пара или инертного газа. Адсорбированные органические вещества при высоких температурах удаляются из углей и окисляются до газообразных соединений.

Для термической реактивации активных углей в отечественной практике получили распространение вращающиеся барабанные печи. Проведение реактивации позволяет получить сорбционную емкость реактивированного угля 80–100 % от исходной. Так, использование термической реактивации угля для станции производительностью 10–20 тыс. м<sup>3</sup>/сут. снижает себестоимость сорбционной очистки в 4–8 раз по сравнению с однократным использованием сорбента.

Зарубежный опыт показал, что экономически целесообразно проводить процессы реактивации отработанных углей на предприятиях-изготовителях либо регионально на кустовых углеактивационных установках.

Доставка угля на реактивацию осуществляется специальными автомобилями «углевозами» в виде 10 %-ной суспензии.

Технологическая схема термической реактивации отработанных активных углей (гранулированных, дробленых) разработана АОТ «ЦПКБХМ» (С.-Петербург) по исходным данным НПО «Неорганика», г. Электросталь.

В технологический процесс включено оборудование, проверенное на производственных установках. Модуль термической реактивации, включающий печь реактивации и холодильник, разработан на базе оборудования, серийно выпускаемого отечественными заводами.

При эксплуатации угольных фильтров ежегодные потери угля при промывке загрузки составляют 5–10 %, а с учетом его термической реактивации суммарные потери составляют 20–25 %. Поэтому для восполнения потерь необходим запас свежего угля. Учитывая это, наиболее оптимальным при организации реактивации угля на больших насосно-фильтровальных станциях является вариант термической реактивации отработанного угля и дополнительный выпуск активных углей на этих же печах, в случае их неполной загрузки, для восполнения потерь. При этом должны быть учтены виды сырья и территориальная близость источников сырья к месту размещения установки реактивации.

### **5.2.7. Использование различных фильтрующих материалов для загрузки фильтров**

Важнейшим элементом водоочистных станций являются фильтровальные сооружения, поскольку только они позволяют получать воду, соответствующую требованиям стандарта.

Интенсификация работы фильтровальных сооружений может быть, в первую очередь, достигнута за счет применения новых высокопористых зернистых загрузок, которые в большинстве случаев могут выполняться из местных материалов: керамзита, дробленых горных пород, шлаков-отходов промышленных производств и многих других зернистых материалов. Использование местных фильтрующих материалов позволяет значительно сократить транспортные расходы, особенно для регионов России, удаленных от карьеров (Волгоградского и Погранского), традиционно поставляющих фильтрующие материалы на водоочистные станции.

Непременным условием использования любого местного зернистого материала в технологии хозяйственно-питьевого водоснабжения является получение официального разрешения Госкомсанэпиднадзора РФ на его применение. Гигиенический сертификат на применение конкретного зернистого материала выдается на основании технологических и санитарно-гигиенических исследований, выполняемых ведущими научно-исследовательскими организациями. Подобные исследования проводит АО «НИИ КВОВ» с участием одного из институтов санитарно-гигиенического профиля.

Применение зернистых фильтрующих материалов с развитой поверхностью зерен позволяет повысить производительность фильтровальных сооружений на 30–50 % без какой-либо реконструкции фильтров и вспомогательного оборудования, только за счет замены фильтрующего слоя.

Для достижения эффективной и экономичной работы фильтровальных сооружений гранулометрический состав любого фильтрующего слоя должен быть близким к оптимальному, что обеспечивается при примерном равенстве времени защитного действия и времени достижения предельной потери напора. ДО «НИИ КВОВ» проводит фильтрационный технологический анализ, что позволяет установить оптимальный для конкретных фильтровальных сооружений гранулометрический состав фильтрующего слоя и определить мероприятия по повышению эффективности их работы за счет совершенствования зернистой фильтрующей загрузки.

#### **5.2.8. Очистка и обессоливание минерализованных природных вод**

Среди существующих промышленных способов обессоливания воды (дистилляция, электродиализ, ионный обмен) обратный осмос и нанофильтрация обладают рядом преимуществ, обусловленных конструктивной несложностью установок, меньшими их габаритными размерами и металлоемкостью, простотой эксплуатации и более низкими энергозатратами.

На основе обратноосмотического и нанофильтрационного методов разделения растворов на АО «Комсомолец» разработана и опробована в реальных условиях базовая технология обессоливания поверхностных и подземных вод с минерализацией до 35 г/л. Эта технология реализуется на автоматизированных установках блочного типа производительностью до 50 м<sup>3</sup>/ч.

В зависимости от качества исходной минерализованной воды установки комплектуются необходимым набором технологических блоков.

Комплекс оборудования, предназначенный для предварительной подготовки исходной воды, ее обессоливания и кондиционирования обессоленной воды может монтироваться как в приспособленном для этих целей помещении заказчика, так и поставляться в контейнерном исполнении.

Предлагаемые решения предполагают не только высокое качество конечного продукта – обессоленной воды, но и полную заводскую готовность водоподготовительного оборудования, а также технологическую и санитарно-гигиеническую надежность.

Установка приготовления воды питьевого качества позволяет при нормативном расходе 100 л пресной воды на человека в сутки, оперативно снабжать питьевой водой населенные пункты с числом жителей 250–12 000 человек.

Очищенная и обессоленная на данных установках минерализованная вода также может использоваться:

- в медицинской и микробиологической промышленности;
- для получения особо чистой воды в производстве изделий электронной техники;
- при приготовлении алкогольных и безалкогольных напитков высокого качества;
- в качестве подпиточной воды для котельных и бойлерных;
- в орошении сельскохозяйственных угодий.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие недостатки имеет технология очистки воды для нужд населения (хозяйственно-питьевая вода) и технология предочистки воды для нужд энерго- и промпредприятий?

2. Какие основные критерии выбора технологий и решений необходимо учитывать при модернизации системы водоподготовки?

3. Какие направления модернизации установок водоочистки предусматриваются в настоящее время?

4. Как работают и в чем преимущество многослойных фильтров?

5. Как работает схема контактной коагуляции в напорных фильтрах с плавающей загрузкой (динамический осветлитель) и с последующим доосветлением воды на механических фильтрах с двухслойной загрузкой?

6. В чем состоит принцип технологии мембранной очистки воды?

7. Какие процессы и в каких случаях используют принцип технологии мембранной очистки воды?

8. Какие типы полупроницаемых мембран используют для мембранной технологии очистки воды?

9. Какие характеристики мембран учитывают при их выборе?

10. Какие методы применяют для снижения концентрации остаточного алюминия при подготовке питьевой воды?

12. Основной недостаток гидравлических камер хлопьеобразования.

13. Особенности конструкций контактных камер хлопьеобразования.

14. Какие конструкции тонкослойных отстойников являются наиболее экономичными?

15. Из каких материалов изготавливают сотоблоки для тонкослойных отстойников?

16. Чем обусловлена низкая эффективность работы традиционных сооружений I ступени очистки?

17. Как можно повысить эффективность работы сооружений I ступени очистки?

18. Преимущества сорбционных методов в технологии удаления загрязнений природного и антропогенного происхождения.

19. Какие варианты применения озона возможны в зависимости от загрязнений?

20. Методы реактивации активных углей.

21. Характеристики фильтрующих материалов для загрузки фильтра.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. СНиП 2.04.02-85\*. Строительные нормы и правила. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат, 1985\*.
2. СанПиН 2.1.4.559-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества / Госкомсанэпиднадзор России. – М., 2001.
3. Расчет и проектирование водопроводных очистных сооружений: методические указания / Сост.: В.В. Шмиголь, П.Г. Быкова; Самарск. гос. арх.-строит. ун-т. – Самара, 2005.
4. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов/ А.Г. Ветошкин. – М.: Высш. шк., 2008. – 639 с.: ил.
5. Фрог Б.Н. Водоподготовка: учебное пособие / Б.Н. Фрог, Ф.П. Левченко – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 656 с.
6. Кожин В.Ф. Очистка питьевой и технической воды. Примеры и расчет. 3-е изд. М.: Стройиздат, 1971.
7. Лаптев А.Г. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: учебное пособие к расчету аппаратов. – Казань: Изд-во Казан. гос. ун-та, 2008.
8. Лаптев А.Г. Гидромеханические процессы в технологии водоочистки. Теоретические основы: учеб. пособие в двух частях / А.Г. Лаптев, И.А. Мутугуллина. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2009.
9. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006.
10. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты окружающей среды: учеб. пособие для вузов / А.Г. Ветошкин – М.: Высшая школа, 2008. 639 с.: ил.
11. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов. 12-е изд / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков – М.: ООО ТИД «Альянс», 2005.
12. Копылов А.С. Водоподготовка в энергетике: учебное пособие для вузов / А.С. Копылов, В.М. Лавыгин, В.Ф. Очков – М.: Издательство МЭИ, 2003. 309 с.: ил.
13. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. 11-е изд. М.: ООО ТИД «Альянс», 2005.
14. Новиков А.В. Улучшение качества природных и очистка сточных вод: учебное пособие / А.В. Новиков, Ю.Н. Женихов. Ч. 1. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2006. 112 с.



15. Алексеев Д.В., Николаев Н.А., Лаптев А.Г. Комплексная очистка стоков промышленных предприятий методом струйной флотации. Казань: КГТУ, 2005. 156 с.
16. Водоподготовка: финансовый кризис – возможна ли модернизация? / И.С. Балаев, Г.Г. Кучма, О.Б. Яковенко, А.В. Ерофеев, С.К. Добровский // Химическая техника. № 2. 2011.
17. Внедрение мембранных технологий на стадии предочистки исходной воды. Экология производства // Энергетика. 2006. № 3.
18. Храменков С.В., Шредер Р. Юго-Западная водопроводная станция – новый шаг в развитии системы водоснабжения Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 11.
19. Бреан А., Глюсина К., Геген Ф., Лангле К. Комплексный подход к проблеме обрастания ультрафильтрационных мембран и контроля качества воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2007. № 4.
20. Мембранные технологии – решение проблемы получения осветленной воды нужного качества / В.В. Солодяников, В.В. Васильев, Д.В. Беляков, О.В. Цабилев // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 4 (48).
21. Коверга А.В, Арутюнова И.Ю. Комплексная оценка мембранных технологий по результатам пилотных испытаний на Москворецкой и Волжской воде. Ч. 1 // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 10.
22. Рейдерман И.Б. Сравнительная оценка ультрафильтрационных установок при очистке воды из Ладожского озера и доочистке Невской водопроводной воды // Водоснабжение и санитарная техника. 2010. № 3.
23. Храменков С.В., Благова О.Е. Мембранные технологии в централизованном водоснабжении в России. Первый опыт эксплуатации Юго-Западной водопроводной станции. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.MosvodoKanal.ru> (дата обращения: 05.10.2011).
24. Современные технологии водоподготовки как фактор обеспечения надежности централизованных систем водоснабжения в России. Ч. 1 / Е.И. Пупырев, В.И. Миркис, Ю.Д. Браславский, Н.Л. Смирнова // Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 1.
25. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения. – М.: Госстройиздат, 1962.
26. Кастальский А.А., Минц Д.М. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения. – М.: Высшая школа, 1962.
27. Журба М.Г., Говорова Ж.М. Водоснабжение. Т. 2. Улучшение качества воды. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2008.

28. Журба М.Г. Пенополистирольные фильтры. – М.: Стройиздат, 1992.

29. Новый взгляд на устаревшее оборудование предочистки ХВО / В.Л. Шорин, В.В. Ситников, М.А. Градусова [и др.] // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 5 (49).

30. МДС 40-3.2000 «Методические рекомендации по обеспечению выполнения требований санитарных правил и норм СанПиН 2.1.4.559-96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества на водопроводных станциях при очистке природных вод».

*Учебное издание*

**Лаптев Анатолий Григорьевич,  
Шинкевич Елена Олеговна**

**ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ  
В ТЕХНОЛОГИИ ВОДООЧИСТКИ**

**ЧАСТЬ II. КОНСТРУКЦИИ И РАСЧЕТ АППАРАТОВ**

Учебное пособие  
по дисциплине

«Химико-технологические процессы, аппараты и режимы»

Кафедра технологии воды и топлива на КГЭУ

Редактор издательского отдела *О.В. Ханжина*  
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*  
Дизайн обложки *Ю.Ф. Мухаметшина*

Подписано в печать 16.04.14.

Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ. Бумага ВХИ  
Усл. печ. л. 12,9. Уч.-изд. л. 14,32. Тираж 500 экз. Заказ № 4781

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,  
420066, Казань, Красносельская, 51

