

№ 132

МИСиС

---

В.Д. Самыгин  
В.А. Игнаткина

# **Процессы и аппараты очистки сточных вод**

Учебное пособие

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

№ 132

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ СТАЛИ  
И СПЛАВОВ

МИСиС



Кафедра обогащения руд цветных и редких металлов

В.Д. Самыгин

В.А. Игнаткина

# **Процессы и аппараты очистки сточных вод**

Учебное пособие

Рекомендовано редакционно-издательским  
советом университета

УДК 628.16  
С17

Рецензент  
канд. техн. наук *О.П. Чернова*

**Самыгин В.Д., Игнаткина В.А.**

С17      Процессы и аппараты очистки сточных вод: Учеб. пособие. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2009. – 223 с.

ISBN 978-5-87623-238-0

Рассмотрены основные процессы очистки сточных вод: механические, химические, физико-химические, физические и биохимические. Приведены характеристики и расчеты основных аппаратов, используемых в схемах очистки сточных вод.

Дана характеристика природных и сточных вод разных отраслей промышленности (металлургическая, металлообрабатывающая, нефтехимическая и др.). Предложены схемы очистки сточных вод разного состава.

Изложены сведения об осадках сточных вод, аппаратах обезвоживания и приведены примеры утилизации осадков, а также принципы организации контроля и правила опробования. Даны рекомендации по проектированию.

Предназначено для студентов специальностей 130405 «Обогащение полезных ископаемых» (спецкурс), 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», 280202 «Инженерная защита окружающей среды», а также для студентов других специальностей, связанных с очисткой сточных вод.

**УДК 628.16**

ISBN 978-5-87623-238-0

© Государственный технологический университет «Московский институт стали и сплавов» (МИСиС), 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Общие сведения .....	5
1.1. Состав и свойства природных вод .....	5
1.2. Состав и свойства сточных вод .....	10
1.3. Классификация процессов очистки сточных вод .....	13
2. Механические процессы и аппараты для сточных вод .....	15
2.1. Отстаивание .....	16
2.1.1. Закономерности движения частиц в поле силы тяжести .....	16
2.1.2. Характеристика осаждаемости взвешенных частиц .....	22
2.1.3. Характеристика основных отстойных сооружений .....	25
2.3. Разделение в поле центробежных сил .....	44
2.3.1. Открытые гидроциклоны .....	44
2.3.2. Напорные гидроциклоны .....	46
2.3.3. Центрифуги .....	49
2.4. Фильтрация .....	50
2.4.1. Основное уравнение фильтрации .....	51
2.4.2. Определение удельного сопротивления осадка и его сжимаемости .....	54
2.4.3. Критерии фильтрования .....	57
2.4.4. Аппараты для макрофильтрации .....	58
2.4.5. Микрофильтрация .....	70
2.4.6. Ультрафильтрация .....	70
3. Химические, физико-химические и физические процессы очистки сточных вод .....	72
3.1. Нейтрализация .....	72
3.2. Химическое осаждение .....	75
3.3. Окисление .....	77
3.3.1. Озонирование .....	78
3.3.2. Хлорирование .....	79
3.3.3. Окисление кислородом воздуха и пероксидом водорода .....	80
3.3.4. Фотохимическое окисление .....	81
3.4. Восстановление .....	82
3.5. Коагуляция .....	83
3.5.1. Способы коагуляции .....	86

3.5.2. Особенности компоновки технологической схемы применения коагулянтов .....	91
3.6. Флокуляция .....	96
3.7. Флотация .....	107
3.7.1. Флотационные аппараты.....	123
3.8. Сорбционные методы.....	139
3.8.1. Сорбция на активных углях.....	142
3.8.2. Сорбция на неорганических материалах.....	143
3.8.3. Ионная адсорбция на смолах.....	147
3.9. Мембранные технологии .....	154
3.9.1. Обратный осмос.....	155
3.9.2. Электродиализ .....	157
3.10. Экстракция органическими растворителями .....	159
3.11. Отгонка (эвапорация).....	161
3.12. Кристаллизация .....	162
3.13. Вымораживание.....	163
4. Биологические процессы очистки сточных вод .....	164
4.1. Аэробный метод .....	167
4.2. Анаэробный метод.....	168
4.3. Процессы нитрификации-денитрификации .....	169
4.4 Аппаратное оформление.....	170
5. Технологии извлечения примесей из сточных вод различных отраслей промышленности мегаполиса .....	177
5.1. Сточные воды металлургических и металлообрабатывающих предприятий .....	178
5.2. Сточные воды нефтеперерабатывающих предприятий .....	195
5.3. Сточные воды предприятий текстильной и пищевой промышленности.....	199
5.4. Малые очистные сооружения.....	201
6. Осадки сточных вод. Обработка и использование осадков.....	203
7. Организация контроля и опробования .....	211
8. Рекомендации по проектированию очистных сооружений .....	216
Библиографический список.....	222

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Водные объекты по физико-географическим и морфометрическим особенностям размещения подразделяются на два типа:

- 1) поверхностные водные объекты;
- 2) подземные водные объекты.

Воды по характеру состава и использованию делятся на *природные* и *сточные*. Природные воды (поверхностные или подземные) после очистки до принятых норм используются для питьевых или технических целей.

## 1.1. Состав и свойства природных вод

В гидрохимии компоненты природных вод делятся на шесть групп.

1. Макрокомпоненты, к которым относятся ионы  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$  ( $CO_3^{2-}$ ). Содержание их в пресной воде изменяется в широких пределах. Эти ионы поступают в воды из горных пород, почвы как результат производственной деятельности человека.

2. Растворенные газы ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2S$ ,  $CH_4$  и др.). Концентрация газов в воде определяется их парциальным давлением и константой Генри.

3. Биогенные вещества, главным образом соединения азота и фосфора, кремния и железа. Концентрация их в пресных источниках может изменяться от следов до 10 мг/л, т.е. данные соединения присутствуют в растворенном или связанном в комплексы виде.

4. Микроэлементы. В эту группу входят все металлы за исключением относящихся к 1-й ( $Mg^{2+}$ ) и 3-й группам (железо), например  $Cu^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ , другие переходные металлы, а также анионы ( $Br^-$ ,  $F^-$ ,  $I^-$  и др.), встречающиеся в водоемах в малых количествах.

5. Растворенные органические вещества (РОВ), аналоги биогенных веществ (3-я группа), но органической природы – органические кислоты, спирты, кетоны, эфиры, азотсодержащие соединения (белки, аминокислоты и т.д.). Для количественного определения пользуются косвенными показателями, характеризующими общее содержание органических соединений: химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК).

По происхождению РОВ могут быть автохтонные – продукты естественного биохимического разложения и аллохтонные – органические вещества, поступающие в водную среду с поверхностными стоками, атмосферными осадками, сточными водами.

6. Токсичные загрязняющие вещества – тяжелые металлы, мышьяк, сурьма, бор, алюминий, нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), фенолы и т.д.

Качество воды характеризуется ее свойствами. Нормы качества питьевой воды и требования к организации контроля качества приведены в СанПиН 2.1.4559–96 и ГОСТ Р 51232–98. Основные показатели природной воды приведены ниже.

1. **Водородный показатель** (рН, ед. рН) – это десятичный логарифм концентрации ионов водорода, взятый с обратным знаком. Для всего живого в воде минимально возможная величина рН равна 5, в питьевой воде допускается рН 6,0...9,0, в воде водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования 6,5...8,5. Величина рН природной воды определяется, как правило, соотношением концентраций гидрокарбонатных анионов и свободного  $\text{CO}_2$ .

2. **Общая жесткость** – это совокупность концентраций ионов магния и кальция. В зависимости от величины общей жесткости воды различают воду *очень мягкую* (0...1,5 мг-экв/л), *мягкую* (1,5...3 мг-экв/л), *средней жесткости* (3...6 мг-экв/л), *жесткую* (6...9 мг-экв/л), *очень жесткую* (более 9 мг-экв/л). Оптимальный физиологический уровень жесткости составляет 3,0...3,5 мг-экв/л. Постоянное употребление внутрь воды с повышенной жесткостью приводит к накоплению солей в организме и, в конечном итоге, к заболеваниям суставов (артриты, полиартриты), образованию камней в почках, желчном и мочевом пузырях. Жесткость выше 4,5 мг-экв/л приводит к интенсивному накоплению осадка в системе водоснабжения и на сантехнике, мешает работе бытовых приборов. Согласно инструкции по эксплуатации бытовой техники жесткость воды не должна превышать 1,5...2,0 мг-экв/л.

3. **Хлориды**. Содержание хлоридов в природных водах колеблется в широких пределах (от долей миллиграмма до нескольких граммов на литр) и обусловлено вымыванием соледержащих пород или сбросом в водоемы промышленных и бытовых сточных вод. Наличие в воде хлоридов более 350 мг/л придает ей солоноватый привкус и приводит к нарушению пищеварительной системы у людей.

4. **Сульфаты**. Содержание сульфатов в природных водах колеблется в широких пределах (от долей миллиграмма до нескольких граммов на литр) и обусловлено вымыванием соледержащих пород или сбросом в водоемы промышленных и бытовых сточных вод. Наличие в воде сульфатов более 500 мг/л придает ей солоноватый

привкус и приводит к нарушению работы пищеварительной системы у людей.

**5. Нитраты.** Нитраты содержатся главным образом в поверхностных водах. При концентрации более 20 мг/л они оказывают токсическое действие на организм человека. Постоянное употребление воды с повышенным содержанием нитратов приводит к заболеваниям крови, сердечно-сосудистой системы, вызывает метгемоглобинемию у детей.

**6. Сульфиды (сероводород).** Встречаются в основном в подземных источниках воды; образуются в результате процессов восстановления и разложения некоторых минеральных солей (гипса, серного колчедана др.). В поверхностных водах сероводород почти не встречается, так как легко окисляется. Появление его в поверхностных источниках может быть следствием протекания гнилостных процессов или сброса неочищенных сточных вод. Наличие в воде сероводорода придает ей неприятный запах, интенсифицирует процесс коррозии трубопроводов и вызывает их зарастание вследствие развития серобактерий.

**7. Железо.** Содержание железа в воде выше норматива способствует накоплению осадка в системе водоснабжения, интенсивному окрашиванию сантехнического оборудования. Железо придает воде неприятную красно-коричневую окраску, ухудшает ее вкус, вызывает развитие железобактерий, отложение осадка в трубах и их засорение. Эти обрастания еще более ухудшают органолептические свойства воды за счет слизиобразования, присущего железобактериям. Высокое содержание железа в воде приводит к неблагоприятному воздействию на кожу, может сказаться на морфологическом составе крови, способствует возникновению аллергических реакций.

**8. Марганец.** По данным ВОЗ, содержание марганца в питьевой воде до 0,5 мг/л не приводит к нарушению здоровья человека. Однако присутствие марганца в таких концентрациях может быть неприятным для водопотребителей, поскольку вода имеет металлический привкус и окрашивает ткани при стирке. Присутствие марганца в питьевой воде может вызывать накопление отложений в системе водоснабжения. Даже при концентрации 0,02 мг/л марганец часто образует пленку на трубах, которая отслаивается в виде черного осадка.

**9. Окисляемость.** Под окисляемостью понимают общее содержание в воде восстановителей органической или неорганической природы. Окисляемость – групповой показатель. В зависимости от при-



роды окислителя различают химическую окисляемость, если при окислении используют химический окислитель, а также биохимическую, когда роль окислительного агента выполняют аэробные бактерии. В свою очередь, химическая окисляемость может быть перманганатной (окислитель  $K_2MnO_4$ ), бихроматной ( $K_2Cr_2O_7$ ) и иодатной ( $KIO_3$ ). Перманганат калия – слабый окислитель, бихромат и иодат калия – примерно равноценные сильные окислители.

*Окисляемость перманганатная* – это общая концентрация кислорода, соответствующая количеству иона перманганата ( $MnO_4^{2-}$ ), потребляемому при обработке данным окислителем пробы воды. Характеризует меру наличия в воде органических и окисляемых неорганических веществ. Этот параметр в основном предназначен для оценки качества водопроводной воды. Значение перманганатной окисляемости выше 2 мг  $O_2$ /л свидетельствует о содержании в воде легко окисляющихся органических соединений, многие из которых отрицательно влияют на печень, почки, репродуктивную функцию организма. При обеззараживании такой воды хлорированием образуются хлоруглеводороды, значительно более вредные для здоровья населения (например, хлорфенол).

*Бихроматную и иодатную окисляемость* называют химической потребностью в кислороде, или ХПК.

**10. Аммоний (по  $NH^+4$ ) (азот аммонийный).** Конечный продукт разложения белковых веществ – аммиак. Наличие в воде аммиака растительного или минерального происхождения не опасно в санитарном отношении. Если же аммиак образуется в результате разложения белка сточных вод, такая вода непригодна для питья. Превышение в питьевой воде ПДК по содержанию аммония может свидетельствовать о попадании фекальных стоков или органических удобрений в источник. По данным ВОЗ, содержание аммония не должно превышать 0,5 мг/л. Постоянный прием внутрь воды с повышенным содержанием аммония вызывает хронический ацидоз и изменения в тканях. Кроме того, аммиак (в виде газа) раздражает конъюнктиву глаз и слизистые оболочки.

**11. Щелочность** (потребление кислоты аликвотной частью образца воды при титровании 0,05 н HCl). Под общей щелочностью воды подразумевается сумма содержащихся в воде гидроксильных ионов  $OH^-$  и продуктов гидролиза карбонатных анионов ( $CO_3^{2-} + H_2O \leftrightarrow HCO_3^- + OH^-$ ).

**12. Кремний.** Кремневая кислота относится к слабым минеральным кислотам, соли которых присутствуют в природной воде. В не-

которых реках, а также в скважинах диоксид кремния присутствует в виде чрезвычайно мелко диспергированных коллоидных частиц.

**13. Сухой остаток.** Минерализация воды характеризуется двумя аналитически определяемыми показателями – сухим остатком и жесткостью. Сухой остаток определяется термогравиметрическим методом (выпаривание пробы воды на водяной бане и высушивание чашки при 105 °С). В процессе обработки из пробы удаляются летучие компоненты и вещества, разлагающиеся с образованием летучих компонентов. Для гигиенистов сухой остаток служит показателем содержания в воде неорганических солей.

**14. Кислород растворенный.** Кислород присутствует в природной воде в результате его растворения при контакте воды с воздухом. Концентрация растворенного O<sub>2</sub> резко снижается с повышением температуры воды. Так, при температуре 20 °С растворимость составляет 9080 мкг/кг, при 60 °С – 4700 мкг/кг, при 80 °С – 1500 мкг/кг.

**15. Углекислый газ.** Углекислый газ присутствует в природной воде как в результате его растворения из воздуха, так и за счет протекания в воде и почве различных биохимических процессов. Равновесная концентрация CO<sub>2</sub> в воде значительно снижается с ростом температуры. Так, при 20 °С растворимость составляет 500 мкг/кг, при 60–190 мкг/кг, при 80–100 мкг/кг. Растворенный в воде углекислый газ образует угольную кислоту  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ , которая диссоциирует с образованием бикарбонатных и карбонатных ионов:  $\text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ;  $\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ . Соотношение между концентрациями различных форм угольной кислоты в воде зависит от pH и температуры.

**16. Хлор остаточный.** С уровнем избыточного, или так называемого остаточного, хлора в воде связывают в настоящее время представление о надежности обеззараживания. Поскольку хлорирование воды проводят хлором, находящимся в воде в свободной или связанной форме, остаточные его количества присутствуют в воде в виде свободного или связанного хлора. Вследствие бактерицидной активности этих форм хлора различны и нормативы их содержания в питьевой воде (для свободного хлора 0,3...0,5 мг/л, для связанного хлора 0,8...1,2 мг/л). Все соединения активного хлора обладают очень сильным бактерицидным действием, но если их концентрация больше нормативов, то они вызывают раздражение кожи, слизистых оболочек, дыхательных путей. Известно также, что при хлорировании воды образуется HClO, которая взаимодействует с железом, образуя растворимые соли, что повышает коррозионную активность такой воды.

17. **Медь.** Соединения меди широко распространены в природе, поэтому их часто обнаруживают в природных водах. Концентрация меди в природных водах обычно составляет десятые доли миллиграмма на литр, в питьевой воде она может увеличиваться за счет вымывания из материалов труб и арматуры, особенно мягкой, активной водой. Концентрация меди и формы ее присутствия в воде зависят от рН воды, а также концентрации в ней карбонатов, хлоридов и сульфатов. Медь придает воде неприятный вяжущий привкус при низких концентрациях (более 1,0 мг/л).

18. **Алюминий.** Высокая концентрация алюминия в природной воде встречается нечасто и зависит от многих факторов (рН, наличия и концентрации комплексообразователей, окислительно-восстановительного потенциала системы, загрязнения промышленными сточными водами). В основном источником поступления алюминия в водопроводную воду являются коагулянты на основе солей алюминия.

19. **Мутность воды** (мг/л) характеризует совокупность присутствующих в природной воде взвешенных частиц различной природы (песок, глина, планктон, водоросли) и определяется с помощью мутномеров или фотоэлектрокалориметров. Мутность питьевой воды не должна превышать 1,5 мг/л.

## 1.2. Состав и свойства сточных вод

Термин «сточные воды» объединяет различные по происхождению, составу и свойствам воды, которые, будучи использованы человеком, получили дополнительные загрязнения и изменили свое качество. Очистка сточных вод является составной и прикладной частью инженерной экологии.

Основные вопросы защиты окружающей среды необходимо решать на основе следующих принципов:

- форма и масштабы человеческой деятельности должны быть соизмеримы с запасами невозобновляемых природных ресурсов;
- неизбежные отходы производства должны попасть в окружающую среду в форме и концентрации, безвредных для жизни. Особенно это относится к водным ресурсам.

Для России организация эффективной очистки сточных вод является актуальной, так как связана с охраной поверхностных вод. Забор воды для питьевого водоснабжения, а также сброс очищенных вод из населенных пунктов происходит с использованием *одних и тех же водных источников*.

Сточные воды подразделяют на жилищно-коммунальные (эквивалентные термины – коммунально-бытовые, бытовые, хозяйственно-фекальные), промышленные (производственные) и ливневые, которые образуются вследствие выпадения атмосферных осадков. Городским бытовым и ливневым сточным водам соответствуют свои канализационные сети. Промышленные сточные воды после предварительной очистки до согласованных норм поступают в городскую канализационную сеть и далее – на городские очистные сооружения биохимической очистки; ливневые сточные воды поступают после механической очистки в поверхностные источники, в эту же ливневую сеть сбрасывают свои предварительно очищенные воды гальванические производства, автомоечные комплексы и т.д. Крупные промышленные предприятия могут иметь полную систему очистных сооружений и сбрасывать свои сточные воды непосредственно в водоемы.

По распределению объема сточных вод жилищно-коммунальные сточные воды составляют 45 % от общего объема, сюда включаются и ливневые городские воды. К промышленным сточным водам относят 29,3 %, но состав этих сточных вод имеет большое влияние на эффективность работы городских очистных сооружений и на самоочищающуюся способность поверхностных вод. На рис. 1.1 приведена классификация сточных вод по отраслевому признаку.

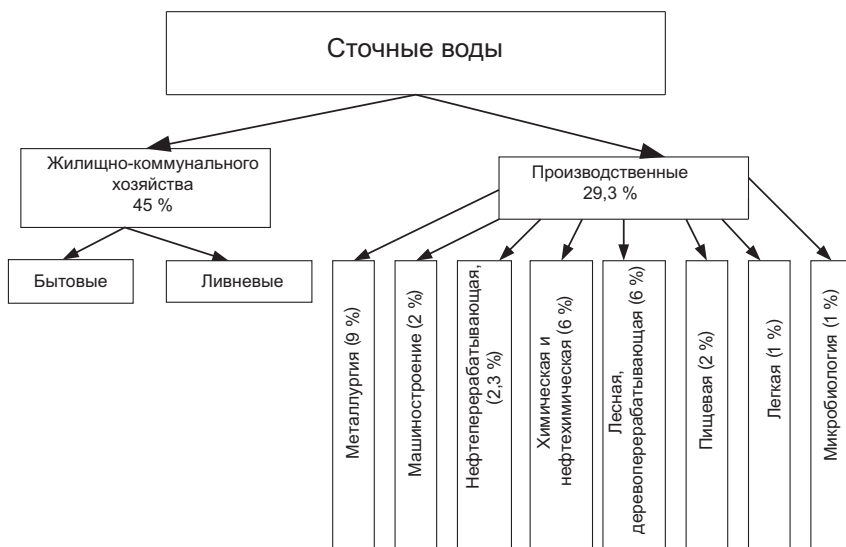


Рис. 1.1. Распределение сточных вод по отраслям промышленности

Знание химического состава сточных вод и фазово-дисперсной характеристики присутствующих загрязняющих веществ – основное условие, позволяющее правильно выбрать методы и технологические приемы очистки. Вещество, вызывающее нарушение норм качества воды, называют загрязняющее воду вещество. Загрязняющие вещества подразделяют на первичные и вторичные. *Первичное загрязняющее вещество* – компонент или иной агент, поступающий в среду из вне; *вторичное загрязняющее вещество* – компонент или агент, образовавшийся непосредственно в окружающей среде.

По своей природе загрязнения сточных вод подразделяют на органические, неорганические и биологические. К загрязнителям органической природы относятся синтетические органические соединения, минеральные масла и другие нефтепродукты, жиры, органические кислоты и т.п. Примеси неорганической природы – песок, глина, щелочи, минеральные кислоты и их соли и т.д. Биологические загрязнения представлены различными видами микроорганизмов: бактерии, вирусы, грибы, водоросли, простейшие, яйца гельминтов. Биологические загрязнения делают сточные воды опасными в эпидемиологическом отношении.

Согласно классификации Кульского Л.А., все примеси сточных вод и рекомендуемые методы воздействия, независимо от их природы, могут быть разделены на четыре группы (табл. 1.1).

Таблица 1.1

**Основные группы примесей по фазово-дисперсионному состоянию**

Группа	Основная характеристика	Природа примесей	Рекомендуемые воздействия
1	Нерастворимые в воде грубо-дисперсные примеси, образующие суспензии и эмульсии. Образуют с водой гетерогенные кинетически неустойчивые системы	Нерастворимые примеси органической и неорганической природы; микроорганизмы	Выделение из воды под действием гравитационной или центробежной сил
2	Коллоидная степень дисперсности с размером частиц не более $10^{-6}$ см. Гидрофильные и гидрофобные коллоидные примеси этой группы образуют с водой гетерогенную систему с особыми молекулярно-кинетическими свойствами	Коллоидные системы; высокомолекулярные соединения; из микроорганизмов – вирусы	Разрушение агрегативной устойчивости примесей

Группа	Основная характеристика	Природа примесей	Рекомендуемые воздействия
3	Молекулярная степень дисперсности с размером частиц не более $10^{-7}$ см. Образуют в воде гомогенные системы	Разнообразны по составу; во многом определяют показатели: запах, окраска, БПК и ХПК	Биологические и физико-химические методы
4	Ионная степень дисперсности с размером частиц не более $10^{-8}$ см.	Основания, кислоты и их соли	Сложные физико-химические методы: ионный обмен, мембранная сепарация и т.д.

Очищенные сточные воды по своим показателям должны удовлетворять нормам сброса по назначению их дальнейшего использования:

- нормам для технической воды
- предельно допустимым нормам сброса для хозяйственно-бытовых водоемов (специальные соглашения для приема на городские сооружения);
- предельно допустимым нормам сброса для водоемов рыбохозяйственного назначения.

Степень очистки сточных вод ~ 94 % достигается практически всегда при разумных капитальных вложениях в очистные сооружения. Достижение 100 %-ной эффективности очистки требует использования сложных физико-химических методов и дорогостоящего оборудования

### 1.3. Классификация процессов очистки сточных вод

Различают механические, химические, физико-химические, физические, а также биологические процессы очистки сточных вод. Каждый процесс в свою очередь включает набор методов и способов очистки вод. Классификация процессов и методов очистки сточных вод приведена на рис. 1.2.

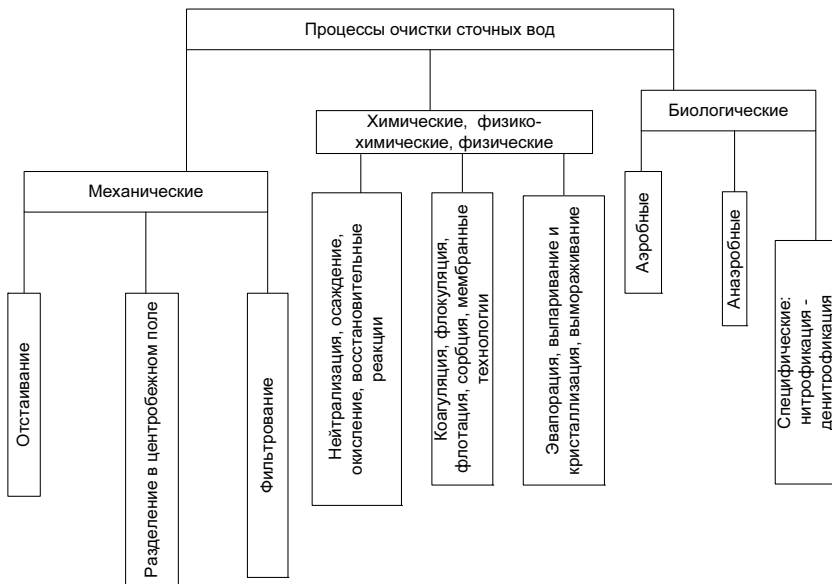


Рис. 1.2. Классификация процессов и методов очистки сточных вод

## 2. МЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

Присутствие нерастворимых (грубодисперсных) примесей в воде приводит к засорению труб и охлаждающих систем, оказывает абразивное воздействие на насосы и измерительное оборудование, ускоряет изнашивание другого оборудования, сказывается на текущих и эксплуатационных расходах предприятий. Поэтому используемая вода должна отвечать принятым нормам по взвешенным веществам. Выделение нерастворимых примесей основано на двух различных принципах.

1. Разделение твердой и жидкой фаз под действием силы тяжести зависит от размера и плотности частиц. Тяжелые частицы, плотность которых больше плотности воды, оседают на дно очистных сооружений, а частицы, плотность которых меньше плотности воды, всплывают на поверхность. Дополнительное наложение центробежных сил повышает эффективность выделения взвешенных веществ. Степень очистки изменяется от 40 до 70 % (с предварительной реагентной обработкой эффективность извлечения примесей возрастает до 90 %).

2. Фильтрованием, или процеживанием, называется процесс, при котором вода, содержащая примеси, пропускается через фильтрующий материал или перегородку, проницаемые для жидкости и непроницаемые для твердых частиц. Процеживание применяют для предварительного удаления загрязняющих нитеобразных и волокнистых примесей, степень очистки от взвешенных веществ 20...50 %. Фильтрование используют для глубокой очистки (доочистки) сточных вод; степень очистки может достигать 99 %; процесс сопровождается большими затратами энергии.

Некоторые авторы относят к механическим методам флотацию, однако без применения реагентов степень очистки данным методом составляет не более 20 %.

Самостоятельно механические методы очистки могут применяться при сбросе очищенных вод в поверхностные водоемы, если объем сточных вод небольшой, а объем водоема мощный и, следовательно, процессы самоочищения не будут нарушены; либо когда качество очищенных промышленных вод механическими способами соответствует требованиям оборотного цикла (заводской или цеховой водооборот).



На рис. 2.1 приведена классификация аппаратов, широко используемых для механической очистки.

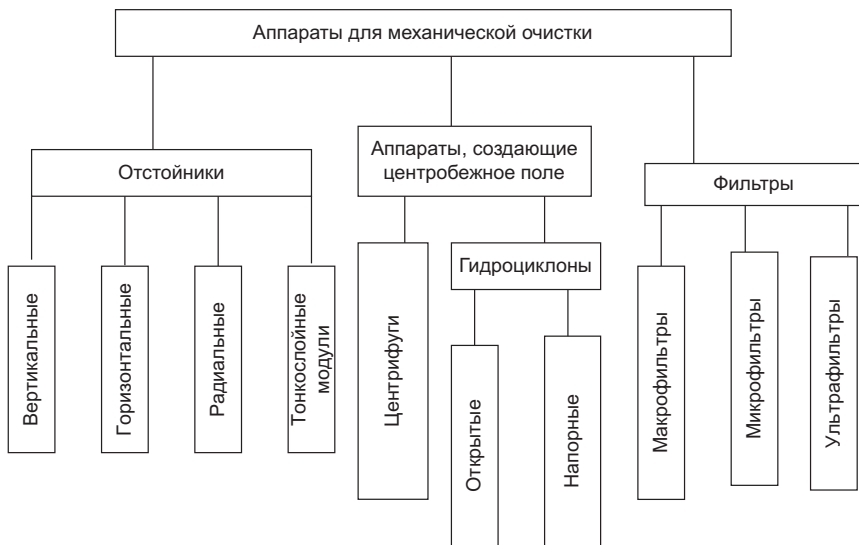


Рис. 2.1. Классификация основных аппаратов для механической очистки

## 2.1. Отстаивание

Отстаивание является самым простым, наименее энергоемким и дешевым методом выделения из сточных вод грубодисперсных примесей с плотностью, отличной от плотности воды. Для успешного разделения необходимо создание в очистном сооружении ламинарного режима течения жидкости.

### 2.1.1. Закономерности движения частиц в поле силы тяжести

Различают движение зерен в свободных и стесненных условиях. Свободным называется падение одиночного тела в безграничной среде. Если же размеры тела соизмеримы с размерами сосуда, в котором происходит падение, или в нем находятся другие тела на достаточно близком расстоянии, то такое падение называется стесненным. Гидравлическая крупность  $u_0$  – скорость равномерного падения твердых частиц в неподвижной воде при определенной температуре.

### Свободное движение частиц

Скорость падения частиц относительно жидкости ( $u$ ) определяется из баланса следующих действующих на частицу сил:

- силы тяжести;
- подъемной (архимедовой) силы;
- гидродинамического сопротивления жидкости;
- сил гидродинамического взаимодействия между частицами.

При свободном падении силы взаимодействия отсутствуют.

Сила тяжести  $F_T$  частицы объемом  $V$  и плотностью  $\rho_T$  равна

$$F_T = V\rho_T g. \quad (2.1)$$

Подъемная сила Архимеда

$$F_a = -V\rho_{cp} g, \quad (2.2)$$

где  $\rho_{cp}$  – плотность среды, которая при свободном режиме равна плотности жидкости  $\rho_j$ .

Сила гидродинамического сопротивления зависит от режима движения, определяемого критерием Рейнольдса ( $Re$ ), и может быть записана в обобщенном виде:

$$F_c = \zeta S \frac{\rho_{cp} \Gamma u^2}{2}, \quad (2.3)$$

где  $\zeta$  – коэффициент гидродинамического сопротивления;

$S$  – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную его движению, так называемое миделево сечение.

Критерий Рейнольдса ( $Re$ ) определяет режим движения тела и равен отношению сил инерции к силам вязкости:

$$Re = \frac{ud\rho_{cp}}{\mu} = \frac{ud}{\nu}, \quad (2.4)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость среды;

$\nu$  – кинематическая вязкость среды  $\left( \nu = \frac{\mu}{\rho_{cp}} \right)$ ;

$d$  – диаметр частицы;

$u$  – конечная скорость движения частицы;

$\rho_{cp}$  – плотность среды.

При  $Re < 2$  наблюдается ламинарный режим, при котором происходит послойное обтекание тела. Потеря энергии в таких условиях связана в основном лишь с преодолением сопротивления трения, и коэффициент гидродинамического сопротивления равен

$$\zeta = \frac{24}{Re}. \quad (2.5)$$

Подставив (2.5) и (2.4) в (2.3) и полагая  $\mu = \nu \rho_{cp}$ , для сферической частицы получим закон Стокса:

$$F_c = \frac{24\mu\pi d^2 \rho_{cp} u^2}{U d \rho_{cp} 4 \cdot 2} = 3\pi\mu du. \quad (2.6)$$

С развитием турбулентности потока при увеличении скорости осаждения для более крупных частиц все большую роль начинают играть силы инерции. Под действием этих сил пограничный слой отрывается от поверхности тела, что приводит к понижению давления за движущимся телом в непосредственной близости от него и образованию вихрей Кармана. При этом разность давлений жидкости на переднюю (лобовую) поверхность тела, встречающую обтекающий поток, и на его заднюю (кормовую) поверхность все больше превышает разность давлений, возникающую при ламинарном вязком обтекании тела. Начиная со значения критерия Ренольдса более 500 роль лобового сопротивления становится преобладающей, и сопротивлением трения можно пренебречь. Этот режим называется турбулентным или автомоделным, а

$$\zeta = 0,44 = \text{const} \quad (2.7)$$

и

$$F_c = F_{\text{тип}} = 0,44 \frac{\pi d^2 \rho_c u^2}{4 \cdot 2} = 0,055\pi d^2 \rho_c u^2. \quad (2.8)$$

Режим движения в интервале  $2 < Re < 500$  называется переходным, а коэффициент сопротивления аппроксимируется уравнением

$$\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}}. \quad (2.9)$$

При движении тел, отличающихся формой от шара, сопротивление возрастает и зависит не только от критерия  $Re$ , но и от фактора формы  $\phi$ , т.е.

$$\zeta = f(\text{Re}, \varphi) \quad (2.10)$$

Для тел неправильной формы в формулах вместо  $d$  используют эквивалентный диаметр  $d_э$ , который определяется из массы шара, равного по массе реальной частице:

$$d_э = \sqrt[3]{V_{ш}} = \sqrt{\frac{m}{\rho_T}} \quad (2.11)$$

где  $V_{ш}$  – объем эквивалентного частице шара;  
 $m$  – масса частицы.

Тогда скорость осаждения частицы произвольной формы  $u$  связывают со скоростью падения эквивалентного шара  $u_э$ :

$$u = \varphi u_э. \quad (2.12)$$

Значения фактора формы  $\varphi$  для частиц некоторых материалов, приведены ниже:

Песок.....	0,5
Кварц.....	0,65
Уголь.....	0,44
Графитовая крошка.....	0,045
Слюда.....	0,0056
Гипс.....	0,25

Уравнение движения частицы можно записать так:

$$m \frac{du}{dt} = Vg(\rho_c - \rho_T) - \zeta S \frac{\rho_c u^2}{2}. \quad (2.13)$$

При установившемся движении  $\frac{du}{dt} = 0$  и

$$u = \sqrt{\frac{2Vg(\rho_T - \rho_c)}{\zeta S \rho_c}}. \quad (2.14)$$

Для нахождения  $u$  необходимо знать  $\zeta$ , которое является функцией  $u$ . Избежать эту трудность можно, применив метод Лященко. Для этого  $u$  выражают через  $\text{Re}$  для частиц, имеющих форму шара:

$$u_э = \frac{\text{Re} \mu}{\rho d}. \quad (2.15)$$

и подставляют в уравнение (2.14), которое затем возводят в квадрат:

$$\frac{Re^2 \mu^2}{\rho^2 d^2} = \frac{2Vg(\rho_T - \rho_c)}{\zeta S \rho_c}. \quad (2.16)$$

Выражение (2.16) преобразуют так, чтобы в правой части стояли известные параметры

$$\zeta Re^2 = \frac{4}{3} \frac{d^3 g \rho^2 \Delta}{\mu^2}, \quad (2.17)$$

где  $\Delta = \frac{\rho_T - \rho_c}{\rho_c}$  – относительная плотность, или

$$\zeta Re^2 = \frac{4}{3} Ar, \quad (2.18)$$

где безразмерное выражение

$$\frac{d^3 \rho_c^2}{\mu^2} g \Delta = Ar \quad (2.19)$$

называется критерием Архимеда.

На рис. 2.2 приведена типовая зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса.

Рассчитав значение критерия Архимеда по плотности минерала и жидкости и по размеру частиц, можно определить, какому гидродинамическому режиму оно будет соответствовать.

Действительно, при ламинарном режиме, когда  $Re < 2$ , имеем, подставляя (2.15) в (2.17):

$$\frac{24}{Re} Re^2 = \frac{4}{3} Ar; \text{ или } Ar_{\text{лам}} = 18 \cdot 2 = 36. \quad (2.20)$$

Следовательно, при  $Ar < 36$  имеем ламинарное движение (см. рис. 2.2).

Аналогично найдем критическое значение для начала турбулентного режима при  $Re = 500$  (см. рис. 2.2)

$$Ar_{\text{турб}} = \frac{3}{4} \cdot 0,44(500)^2 = 82\,500. \quad (2.21)$$

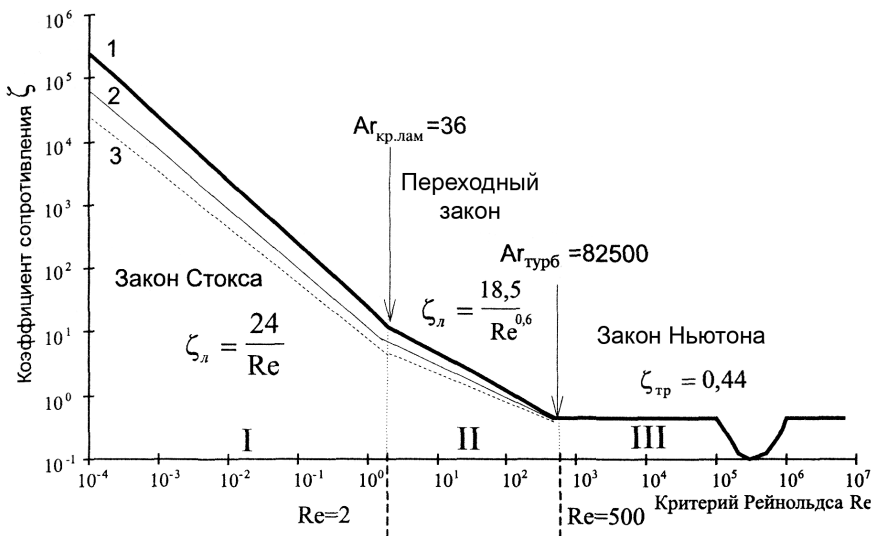


Рис. 2.2. Типовая зависимость коэффициента сопротивления от критерия Рейнольдса

Скорость осаждения для частиц нешарообразной формы меньше; уменьшается она также и при стесненном падении.

### *Стесненное падение*

При стесненном падении частиц дополнительно к силам тяжести, архимедовой и силе сопротивления необходимо учитывать силы гидродинамических взаимодействий между частицами и средой. Вокруг каждой частицы существует поле скоростей, отличных от скорости в объеме жидкости. Когда частицы достаточно сближаются, они попадают во взаимные поля скоростей, что и обуславливает микропроцесс их гидродинамического взаимодействия. По гипотезе Хаппеля считается, что возмущения, вносимые в поток каждой частицей, локализованы в объеме окружающей ее жидкости  $V$ , радиуса  $b$ , который равен

$$b = \frac{d}{2} \varepsilon^{-\frac{1}{3}}, \quad (2.22)$$

где  $\varepsilon$  – объемная доля дисперсной фазы, а  $m = 1 - \varepsilon$  – объемная доля сплошной фазы, или порозность, или коэффициент разрыхления.