

Л. Д. ТЕРЕХОВ
Г. И. ВОЛОВНИК
Е. Л. ТЕРЕХОВА

МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

«Инфра-Инженерия»

УДК 628.16
ББК 38.761.1
Т35

Рецензенты:
кафедра гидравлики, водоснабжения и канализации
Хабаровского государственного технического университета
(заведующий кафедрой доктор технических наук, профессор *М. Н. Шевцов*);
кандидат технических наук, директор Дальневосточного
предприятия «Росводоканал», почетный строитель РФ *А. Д. Лернер*

Терехов, Л. Д.

Т35 Методы очистки воды : учебное пособие / Л. Д. Терехов, Г. И. Воловник, Е. Л. Терехова. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 320 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-1280-3

Содержится систематическое изложение физико-химических основ технологии очистки воды, принципов расчета и конструирования очистных установок. Подробно рассматриваются вопросы регенеративной и деструктивной очистки.

Для студентов направления 08.04.01 «Строительство» специальности «Водоснабжение и водоотведение», изучающих дисциплины «Водоснабжение и водоотведение промышленных предприятий», «Реконструкция инженерных систем и сооружений». Может быть полезно специалистам, занимающимся вопросами интенсификации и реконструкции сооружений систем водоснабжения и водоотведения.

УДК 628.16
ББК 38.761.1

ISBN 978-5-9729-1280-3

© Терехов Л. Д., Воловник Г. И., Терехова Е. Л., 2023
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

ЧАСТЬ 1. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ 4

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАЧЕСТВЕ ВОДЫ И СПОСОБАХ ЕЕ ОЧИСТКИ 5

1.1. Классификация водных загрязнений 5
1.2. Технологическая характеристика водных примесей 8

ЧАСТЬ 2. РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ОЧИСТКА 12

2. ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПЕРВОЙ ГРУППЫ ДИСПЕРСНОСТИ 12

2.1. Очистка воды седиментацией 12
2.1.1. Гидравлическая крупность 12
2.1.2. Кинетика осаждения полидисперсной взвеси 16
2.1.3. Процесс седиментации в отстойниках 20
2.1.4. Улучшение гидравлических условий отстаивания 24
2.1.5. Улучшение седиментационных свойств ГДП 27
2.1.6. Интенсификация отстаивания методом соосаждения ... 30
2.2. Очистка воды от ГДП в поле центробежных сил 43
2.2.1. Общие сведения 43
2.2.2. Напорные гидроциклоны 45
2.2.3. Открытые гидроциклоны 51
2.3. Процеживание 55
2.3.1. Общие сведения 55
2.3.2. Основные закономерности процесса процеживания 57
2.3.3. Технологические характеристики осадков 59
2.3.4. Установки для процеживания 62

3. ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ВТОРОЙ ГРУППЫ ДИСПЕРСНОСТИ 64

3.1. Общие сведения 64
3.2. Коагуляция 66
3.2.1. Коагуляция в электрическом и магнитном поле под влиянием физических факторов 66
3.2.2. Коагуляция при химической обработке воды 68
3.2.3. Коагуляция в объеме и контактная коагуляция 70
3.3. Осветлители со взвешенным осадком 72
3.3.1. Общие сведения 72
3.3.2. Псевдосжижение 73

3.3.3. Закономерности очистки воды
в слое взвешенного осадка 75
3.3.4. Технологическое моделирование процесса очистки
в слое взвешенного осадка..... 77
3.4. Очистка воды фильтрованием 79
3.4.1. Общие сведения..... 79
3.4.2. Физическая модель работы фильтра 80
3.4.3. Технологическое моделирование фильтрования
по Д. М. Минцу..... 84
3.4.4. Скорость фильтрования 90
3.4.5. Грязеемкость фильтрующей загрузки 91
3.4.6. Промывка фильтров..... 93
3.5. Очистка электрофорезом..... 94
3.6. Очистка воды ультрафильтрацией 96
4. ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
ТРЕТЬЕЙ ГРУППЫ ДИСПЕРСНОСТИ. 99
4.1. Общие сведения 99
4.2. Очистка воды сорбцией (адсорбцией) 100
4.2.1. Общие сведения..... 100
4.2.2. Сорбенты и их характеристика..... 103
4.2.3. Технология сорбционной очистки. 106
4.2.4. Регенерация сорбента. 114
4.3. Экстракция 116
4.3.1. Общие сведения..... 116
4.3.2. Экстрагенты и их характеристика 117
4.3.3. Технологические расчеты установок для экстракции... 119
4.3.4. Экстракторы и их схемы 121
4.4. Очистка воды десорбцией 124
4.4.1. Общие сведения..... 124
4.4.2. Дегазаторы и их технологический расчет..... 127
4.4.3. Очистка воды методом отгонки (эвапорация)..... 129
5. ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ
ЧЕТВЕРТОЙ ГРУППЫ ДИСПЕРСНОСТИ..... 134
5.1. Очистка методом ионного обмена 134
5.1.1. Общие положения 134
5.1.2. Иониты и их характеристики..... 138
5.1.3. Условия применения ионообменных установок
с неподвижной и псевдосжиженной загрузкой..... 140
5.1.4. Технологический расчет и эксплуатация
ионообменных установок..... 143
5.2. Мембранные методы очистки воды 149
5.2.1. Общие сведения..... 149

5.2.2. Очистка воды гиперфильтрацией и нанофильтрацией 150
5.2.3. Технологические расчеты установок обратного осмоса.. 157
5.2.4. Мембранные элементы и аппараты для обратного осмоса 160
5.2.5. Примеры очистки природных и сточных вод обратным осмосом 160
5.3. Очистка воды электродиализом 162
6. ХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА 169
6.1. Краткие сведения из теории 169
6.2. Нейтрализация воды и корректировка pH 173
6.2.1. Общие сведения 173
6.2.2. Корректировка pH при коагуляции природных вод кислым коагулянтом 176
6.2.3. Корректировка pH для изменения формы загрязняющих примесей 178
6.2.4. Установки для нейтрализации воды и корректировки pH 179
6.3. Деструкция примесей окислением и восстановлением 182
6.3.1. Общие сведения 182
6.3.2. Окислители и процессы окисления 185
6.3.3. Восстановители и процессы восстановления 201
6.3.4. Аппаратура для очистки воды окислением и восстановлением 205
6.4. Перевод растворенных примесей в труднорастворимые формы 210
6.4.1. Общие сведения 210
6.4.2. Высаливание 212
6.4.3. Образование труднорастворимых соединений тяжелых металлов 214
6.4.4. Известкование как способ перевода некоторых примесей в труднорастворимое состояние 216
6.4.5. Реагентное умягчение воды. 217
6.4.6. Некоторые способы перевода загрязнений в труднорастворимое состояние 218
6.5. Стабилизация воды 219
7. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА 223
7.1. Краткие сведения из теории 223
7.2. Разрушение молекул воды при электролизе 223
7.3. Электролиз хлоридов 224
7.4. Электрохимическая деструкция водных загрязнений 225
7.4.1. Очистка от соединений циана 226

7.4.2. Очистка от шестивалентного хрома и ионов тяжелых металлов ... 226
7.4.3. Электрохимическая деструкция органики ... 227
7.5. Установки для электрохимической очистки ... 229
8. БИОХИМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ... 233
8.1. Краткие сведения из теории ... 233
8.1.1. Область применения биохимической очистки ... 233
8.1.2. Ферменты, как катализаторы химических процессов ... 235
8.1.3. Скорость ферментивной реакции ... 236
8.1.4. Состав биоценозов ... 238
8.1.5. Физиология микроорганизмов ... 239
8.1.6. Закономерности синтеза биомассы ... 240
8.1.7. Влияние внешних факторов на микроорганизмы ... 242
8.2. Биохимические процессы очистки в аэробных условиях ... 246
8.2.1. Общие сведения ... 246
8.2.2. Биохимическая деструкция белков ... 246
8.2.3. Биохимическая деструкция жиров ... 247
8.2.4. Биохимическая деструкция углеводов ... 248
8.2.5. Биохимическая деструкция нуклеиновой кислоты ... 249
8.2.6. Биохимическая деструкция углеводородов ... 250
8.2.7. Биохимическая деструкция загрязнений бытовых сточных вод ... 251
8.2.8. Аэробное окисление железа и марганца ... 252
8.3. Биохимические процессы очистки в анаэробных условиях ... 253
8.3.1. Общие сведения ... 253
8.3.2. Анаэробная денитрификация ... 254
8.3.3. Анаэробное восстановление тяжелых металлов ... 255
8.3.4. Биологическая дефосфатация в анаэробных условиях ... 255
8.4. Сооружения для аэробной очистки сточных вод ... 256
8.4.1. Общие сведения ... 256
8.4.2. Характеристика биологической массы ... 257
8.4.3. Аэротенки ... 258
8.4.4. Биореакторы с иммобилизованной микробиальной массой ... 266
8.4.5. Биофильтры с объемной загрузкой ... 267
8.4.6. Биосорберы ... 270
8.5. Сооружения для анаэробной очистки сточных вод ... 274
8.5.1. Общие сведения ... 274
8.5.2. Метантенки ... 275
8.5.3. Реакторы с иммобилизованным анаэробным илом ... 278
9. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ ... 283
9.1. Общие положения ... 283

9.2. Свойства осадка, влияющие на водоотдачу 284
9.3. Уплотнение осадков 286
9.3.1. Гравитационное уплотнение 287
9.3.2. Оптимизация условий гравитационного уплотнения осадков 288
9.3.3. Кондиционирование путем изменения основных свойств осадка..... 289
9.3.4. Уплотнение в полях массовых сил 290
9.3.5. Сгущение осадков большой влажности флотацией..... 290
9.4. Обезвоживание осадка 291
9.4.1. Методы кондиционирования осадка 291
9.4.2. Изменение дисперсного состава осадков 291
9.4.3. Стабилизационная обработка органических осадков 293
9.4.4. Сушка осадков 294
9.5. Ликвидация осадков 296
9.5.1. Компостирование органических осадков..... 296
9.5.2. Термическая деструкция органических осадков..... 296
9.6. Захоронение осадков 298
ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 299
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... 303

ЧАСТЬ 1. МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАЧЕСТВЕ ВОДЫ И СПОСОБАХ ЕЕ ОЧИСТКИ

Вода – один из лучших растворителей, а водные потоки обладают транспортирующей способностью. Поэтому как природные, так и сточные воды всегда содержат разнообразные примеси.

Состав примесей и их концентрации определяют качество воды и ее пригодность для использования в тех или других целях.

Критерием удовлетворительного качества и пригодности является условие, согласно которому присутствующие в воде примеси по концентрациям не будут превышать нормируемых предельно-допустимых концентраций (ПДК). Поскольку значения ПДК данной примеси для разных потребителей воды различны, к ее качеству предъявляются не одинаковые требования и в одних случаях она оказывается пригодной, в других – непригодной.

Питьевая вода является пищевым продуктом, она должна быть безопасной для человека и иметь привлекательный товарный вид. Нормы качества питьевой воды ограничивают содержание токсических примесей, ухудшающих органолептические свойства, содержат требования санитарно-гигиенического характера. Качество воды, используемой в промышленности, должно соответствовать условиям производственных процессов, не вызывать засорения и износа оборудования. Согласно этому вводятся ограничения в содержание грубодисперсных примесей, некоторых солей и газов [84].

Качество сточных вод, поступающих в водные объекты, должно удовлетворять требованиям, исключающим нарушения экологической обстановки или приводящим к потере водными объектами своего хозяйственного значения (источники водоснабжения, рыбное хозяйство и т. д.) [95].

Во всех случаях качество воды ограничивается значениями предельно допустимых концентраций (ПДК) тех или иных водных примесей.

Загрязнением считается водная примесь, концентрация которой превышает установленное для нее предельно-допустимое значение.

Ясно, что примесь для одних условий водопотребления может считаться загрязнением, а для других – нет. Например, для питьевой воды ПДК по мутности составляет 1,5 мг/л, для технической – 20 мг/л, а при фактической мутности – 10 мг/л в первом случае вода загрязнена, во втором – не считается загрязненной.

Применение загрязненной воды возможно, если ее очистить, т. е. уменьшить концентрацию содержащихся в ней загрязнений до нор-

мируемого максимума $C_{доп}$. Отсюда следует, что минимально необходимый эффект очистки $Э$ % составляет:

$$Э = \frac{C_{en} - C_{доп}}{C_{en}} 100\ \%, \qquad (1.1)$$

где C_{en} – концентрация данного загрязнения в воде до ее очистки.

По тому, что происходит в процессе очистки с загрязнениями, ее способы могут быть разделены на две группы: регенеративные и деструктивные.

При регенеративной очистке загрязнения выделяются без изменения химического состава. Деструктивная очистка приводит к разрушению и изменению состава загрязняющих веществ. В результате образуются соединения, не являющиеся в данном случае загрязнениями или легче выделяющиеся из воды. В том случае, когда возможны и деструктивная и регенеративная очистка, выбор обосновывается технико-экономическими соображениями.

1.1. Классификация водных загрязнений

Отдельные технологии очистки воды обладают определенной степенью универсальности, т. е. пригодны для удаления различных водных загрязнений. В середине 60-х годов украинский академик Л.А. Кульский разработал классификацию водных примесей, объединив в общие группы те из них, которые могут удаляться одинаковыми методами [54].

Признаком для классификации примесей послужило их фазово-дисперсное (лат. *dispergo* – рассеиваю) состояние. Фазой называются однородные части системы, отделенные друг от друга поверхностями раздела. Если система однофазная (гомогенная), то частицы, входящие в ее состав не имеют поверхностей раздела, что затрудняет их удаление. В гетерогенных (многофазных) системах частицы загрязнений имеют поверхности раздела между фазами, а поэтому менее стабильны и легче удаляются при очистке.

Если диаметр частиц примесей, условно принимаемых шарообразными, *d* см, и его можно выразить формулой

$$d = \frac{1}{10^n}, \qquad (1.2)$$

то дисперсностью будет называться знаменатель, т. е. 10^n. Так, при диаметре частиц 1 мм, т. е. 0,1 см, дисперсность равна 10, при диаметре 1 мкм – 10^4, при диаметре 1 нм (нанометр равен 10^{-9} м) – 10^7. Чем меньше размер частицы, тем больше дисперсность.

По классификации Л.А. Кульского к первой группе примесей относятся частицы с дисперсностью 10^5 и менее, ко второй – от 10^5 до 10^6, к третьей – от 10^6 до 10^7, к четвертой – более 10^7.

При диспергировании (измельчении) вещества выполняется работа против действия молекулярных сил сцепления, что приводит к избытку энергии на поверхности по сравнению с энергией в объеме частицы. Величина поверхностной энергии обратно пропорциональна площади поверхности, на которой она накапливается.

Поверхностная энергия определяется по зависимости

$$\sigma_0 = \sigma_в S_{уд}, \qquad (1.3)$$

где $\sigma_в$ – коэффициент поверхностного натяжения воды; $S_{уд}$ – удельная площадь поверхностей частиц – отношение площади межфазной поверхности к объему (табл. 1.1).

Таблица 1.1

Изменение удельной площади поверхности частиц условно кубической формы в объеме 1 см^3

Размер ребра кубика, см	Число частиц	$S_{уд}$, см^2/см^3	Дисперсность
1	1	6	1
0,1	10^3	60	10
0,0001	10^{12}	$6 \cdot 10^4$	10^4
10^{-6}	10^{18}	$6 \cdot 10^6$	10^6

Существует естественная тенденция к уменьшению поверхностной энергии, в соответствии с которой частицы стремятся к слипанию (когезии). Образующаяся более крупная, чем первоначальные, частица имеет меньшую поверхностную энергию. Когезия происходит при сближении частиц на расстояния, находящиеся в пределах действия молекулярных сил.

Действительная форма частиц отличается от шарообразной и поверхностная энергия распределяется по поверхностям неравномерно, концентрируясь в отдельных точках (активных центрах). Считают, что активные центры образуются в местах выступов. При слипании силовое взаимодействие возникает между активными центрами контактирующих частиц.

Примеси первой группы наиболее распространены и по массе часто составляют свыше 90 % всех водных загрязнений. Загрязнения представляют собой грубодисперсные примеси (ГДП), к которым относятся: суспензии, эмульсии, патогенные микроорганизмы, пузырьки газов и др.

Загрязнения второй группы – коллоиды: среди них различные органические и минеральные вещества, в том числе гуминовые, придающие природным водам цветность. Сточные воды содержат в коллоидальном состоянии углеводы (клетчатка, целлюлоза, крахмал), белки, альбумин,

гемоглобин, казеин молока, животный и рыбий клей, мыла, красители, гидроксиды железа и алюминия, некоторые патогенные микроорганизмы, вирусы. Загрязнения первой и второй групп образуют гетерогенные системы, состоящие из нескольких фаз.

К примесям третьей группы относятся молекулярно растворенные газы, фульво и гуминовые кислоты, фенолы, альдегиды, кетоны, амиды кислот, моносахариды, красители и др.

К четвертой группе относятся ионы: катионы металлов, диссоциированные соли, кислоты, щелочи. Загрязнения третьей и четвертой групп образуют в воде однофазные (гомогенные) системы.

Между состояниями веществ, четко определяющими их положение в каждой группе, существуют еще и промежуточные состояния. Это позволяет путем специальной обработки переводить вещества из одной группы в другую и этим упростить задачи очистки. Изменяя такие факторы, как pH, солевой состав, температуру, можно варьировать приемы очистки и оптимизировать технологические процессы улучшения качества воды.

Деструктивная очистка (химическая, электрохимическая, биохимическая) проходит наиболее эффективно, если примеси имеют высокую дисперсность частиц (4 и 3 группы).

Как отмечалось, для удаления загрязнений, входящих в разные группы, применимы различные методы очистки (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Методы очистки воды от загрязнений

Группа	Специфические методы очистки
Первая	1. Седиментация безреагентная и с применением флокулянтов 2. Выделение ГДП в поле центробежных сил 3. Процеживание (фильтрация) и микрофлотация 4. Деструкция (химическая, биохимическая)
Вторая	1. Коагуляционные методы (коагуляция в объеме и контактная) 2. Ультрафильтрация 3. Деструкция (химическая и биохимическая)
Третья	1. Диффузионная очистка 2. Деструкция (химическая, электрохимическая, радиационная, биохимическая)
Четвертая	1. Гиперфильтрация и нанофильтрация 2. Ионообменные методы 3. Электродиализ 4. Перевод ионов в недиссоциированное состояние

В большинстве случаев очистка воды сопровождается этапом укрупнения частиц водных загрязнений, которые слипаются (когезия) либо закрепляются на поверхностях значительно более крупных частиц (адгезия). Этот естественный процесс связан со стремлением микрочастиц снизить свою поверхностную энергию.

Процесс укрупнения является проявлением массообмена, характеристикой которого служит количество переносимой массы

$$G = \mathrm{kF}\Delta \mathrm{c}\,\tau,$$

где F – площадь контактной поверхности, на которую направлен перенос; Δc – движущая сила процесса, равная среднему значению разности концентраций вещества компонента в области, из которой осуществляется перенос, и области, куда он направлен; c – продолжительность процесса; K – коэффициент массообмена определяемый экспериментально в зависимости от особенностей происходящих явлений (коэффициент адсорбации, экстракции и т. д.).

Механизм переноса зависит от дисперсности частиц: для грубодисперсных перемещение частиц происходит под влиянием инерционных сил, для коллоидов – за счет теплового броуновского движения, причина перемещения молекул и ионов – диффузия. Как перемещения коллоидов, так и молекул (ионов) вызывается неравномерным распределением вещества компонента в объеме воды.

Закрепление частиц на поверхностях и их слипание требует преодоления энергетического порога (двойного электрического слоя), возникающего у заряженных (полярных) частиц. Если поверхности гидрофильны, они смачиваются водой и покрыты слоем ее молекул, что препятствует контакту.

Слипание или прилипание частиц требует сближения на расстояние действия межмолекулярных сил, примерно на 20–50 нм.

Оптимизация условий укрупнения требует: максимального сближения частиц, что достигается перемешиванием либо расчленением потока на тонкие струйки при фильтрации; увеличения площади контактной поверхности, перемешивания с целью поддержания по всей площади одинаковых условий, при которых $\Delta c = const$.

1.2. Технологическая характеристика водных примесей

Состояние водных примесей обусловлено совместным влиянием двух групп факторов: стабилизирующих и дестабилизирующих. Стратегия очистки заключается в подавлении влияния первых и усилении влияния вторых. Технологическая характеристика водных примесей включает оценку этих факторов и указывает способы влияния на них.

Загрязнения первой группы ГДП находятся под влиянием двух сил: стабилизирующих, которые зависят от турбулентности потока воды и дестабилизирующих, массовых, к которым относятся силы тяжести и центробежные силы. В неподвижной воде, имеющей постоянную температуру во всем объеме, полностью устраняется влияние турбулентности, и примеси либо оседают, либо всплывают в зависимости от плотности вещества частиц. Таким образом, ГДП кинетически неустойчивы. Очистка от ГДП седиментацией, т. е. отстаиванием, возможна при уменьшении турбулентности потока за счет снижения его скорости и особенно – при ламинарном режиме движения.

Специфическим видом ГДП являются эмульсии, капли неполярных гидрофобных жидкостей, например нефтепродуктов или масел. Эмульсии образуются в результате механического, акустического или электрического диспергирования и являются кинетически неустойчивыми. В результате коалесценции, т. е. самоукрупнения частиц, эмульсии разрушаются и примеси отделяются от воды. Кинетическую устойчивость эмульсиям придают эмульгаторы, образующие на поверхностях капель гидрофильные пленки, препятствующие слиянию при контакте. К эмульгаторам относятся некоторые поверхностно-активные вещества, высокомолекулярные соединения (белки, искусственные полимеры), а также высокодиспергированные твердые частицы (глины и другие). Для очистки от устойчивых эмульсий необходима предварительная деэмульгация, т. е. разрушение защитных пленок из эмульгаторов.

Частицы малоконцентрированных эмульсий имеют дисперсность 10^5 и по своим свойствам приближаются к примесям второй группы. Коллоиды, которыми представлены примеси второй группы, обладают кинетической и агрегативной устойчивостью. Кинетическая устойчивость проявляется в том, что под действием броуновского движения коллоидальные частицы равномерно распределяются во всем объеме воды, в то время как ГДП распределены неравномерно. Причина кинетической устойчивости – в малых размерах коллоидальных частиц, а их самоукрупнение ограничено агрегативной устойчивостью, т. е. свойством сохранять во времени свою дисперсность и не слипаться. Коллоидальные частицы полярны, а их заряды – одноименны. Дестабилизация и коагуляция коллоидов требует специальной обработки воды, при этом коллоиды становятся неустойчивыми, и коагулируются с образованием укрупненных частиц уже относящихся к ГДП.

Загрязнения первой и второй групп дисперсности, как отмечалось, имеют поверхности раздела, в которых формируется поверхностный слой толщиною в несколько молекулярных диаметров, состоящий из атомов и молекул вещества примеси.

Укрупнение (агрегация) частиц примесей особенно интенсивно при коагуляции коллоидов, но наблюдается и у ГДП, главным образом высокодисперсных.

Процесс агрегации зависит от характера взаимодействия частиц с водой.

Материал частицы может обладать гидрофильностью, или гидрофобностью. В первом случае вся поверхность частиц гидрагирована, т. е. покрыта слоем молекул воды, препятствующих агрегации, во втором – поверхность свободна. К гидрофильным материалам относятся, например, глины, крахмал, желатин; к гидрофобным – уголь, масла, нефтепродукты.

Агрегация частиц загрязнений первой и второй группы (после коагуляции последних) положительно влияет на процесс очистки, так как при этом образуются ГДП малой дисперсности.

Примеси молекулярной дисперсности, относящиеся к третьей группе, образуют однофазную систему. Под влиянием диффузии молекулы загрязнений равномерно распределяется во всем объеме воды.

Молекулярные примеси обладают кинетической и агрегационной устойчивостью, т. е. самопроизвольно не выделяются из воды и не меняют со временем дисперсность. Исключение составляют те молекулы, которые вступают в химическое взаимодействие и образуют новые вещества в виде коллоидов или ГДП, а также молекулы, меняющие дисперсность и образующие нерастворимые соединения под влиянием внешних условий (изменение солевого состава воды, pH и др.).

Механизмом, нарушающим устойчивость загрязнений третьей группы, является диффузия (лат. распространение). Примеси переходят из воды в другие фазы: на поверхность твердых тел, в не растворяющиеся в воде жидкости и газы. При удалении из воды этих поглотителей одновременно удаляются и молекулярные загрязнители.

К молекулярным загрязнениям относятся растворенные в воде газы. Растворимость газа зависит от пропорционального давления (давления данного газа в газовой среде над раствором) и от температуры. Понижая давления газовой среды над раствором и повышая температуру воды, создают условия для уменьшения растворимости газа, который выделяется в виде грубодисперсных пузырьков.

В четвертую группу входят примеси, диссоциирующиеся в воде на ионы. Как и молекулы, ионы образуют истинные растворы, обладают кинетической и агрегационной устойчивостью, способностью к диффузии.

Особенность ионов заключается в их гидратации, т. е. образовании агрегата, в котором ион связан с несколькими молекулами воды. Гидратированные ионы ведут себя как самостоятельные частицы, имеющие размеры, близкие или превышающие размеры молекул. Это обстоятельство используется при гиперфильтрации, когда под влиянием искусственно созданных для возникновения обратного осмоса условий, через полупроницаемые перегородки проходят молекулы воды, но задерживаются гидратированные ионы. Для очистки используется способность ионов вступать в реакции двойного обмена и замещать в ионообменных

материалах эквивалентное количество других ионов, не являющихся в данном случае загрязнителями. Ионы – полярные частицы, перемещающиеся в электрическом поле к электродам с противоположным по знаку зарядом. На этом явлении основан электродиализ.

Использование классификации примесей по фазово-дисперсным характеристикам указывает основные направления в поиске технологии водообработки, но окончательные обоснования во всех нестандартных случаях нуждаются в обязательной экспериментальной проверке.

Водные примеси устойчиво пребывают в водной среде и не выделяются из нее при влиянии определенных стабилизирующих факторов, одинаковых для частиц одной группы дисперсности. С другой стороны существуют и в определенных условиях могут стать превалирующими, дестабилизирующие факторы, способствующие выделению примесей из воды.

Задача очистки состоит в том, чтобы ослабить действие первых и усилить влияние вторых факторов.

Для очистки от загрязнений одной группы дисперсности оказываются пригодными несколько альтернативных методов, которые обладают разной эффективностью в конкретных условиях применения (состав загрязнений, их концентрации, температура воды, ее расходы и т. д.). С учетом этих обстоятельств и выбирается метод очистки из числа альтернативных.

? Контрольные вопросы

1. Какими показателями определяется качество воды?
2. В каком случае качество воды признается удовлетворительным и пригодным для использования потребителем?
3. В каком случае водная примесь считается загрязнением и что необходимо для того, чтобы она перестала быть загрязнением?
4. Какой вывод может быть сделан, если при расчете требуемого эффекта очистки получен результат равный нулю или отрицательное число?
5. Чем отличается регенеративная очистка от деструктивной?
6. По какому условию сгруппированы водные примеси в отдельные группы и каким отличительным признаком обладают примеси, входящие в отдельные группы по классификации Л. А. Кульского?
7. Что называется дисперсностью частицы?
8. Как влияет дисперсность на самоукрупнение частиц водных примесей?
9. В каких практических целях используется классификация водных примесей по Л. А. Кульскому?
10. Укажите основные технологические характеристики водных примесей.

ЧАСТЬ 2. РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ОЧИСТКА

2. ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПЕРВОЙ ГРУППЫ ДИСПЕРСНОСТИ

2.1. Очистка воды седиментацией

Седиментация (лат. – оседание) естественный процесс выделения из воды ГДП путем осаждения или всплывания под влиянием силы тяжести. В технике очистки воды седиментация, или отстаивание, – самая распространенная и достаточно эффективная технология. Как отмечалось, для повышения эффективности отстаивания следует ограничить турбулентность потока, что достигается уменьшением скорости движения воды в отстойниках, или созданием условия для ламинаризации потока.

2.1.1. Гидравлическая крупность

Основной технологической характеристикой частицы ГДП является гидравлическая крупность частицы, т. е. скорость ее свободного осаждения в неподвижной воде, имеющей температуру +20 °С.

Под свободным осаждением понимается условие, когда частица не взаимодействует с другими частицами. Для того чтобы установить главные факторы, влияющие на величину гидравлической крупности, рассмотрим условия осаждения одиночной шарообразной частицы диаметром d в неподвижной воде.

Частица осаждается с постоянной скоростью θ, равной искомому значению гидравлической крупности. Предположение о равномерном осаждении подтверждается практикой: скорость осаждения устанавливается постоянной при погружении частицы всего на несколько мм.

На частицу действуют две взаимно уравновешиваемые силы: G – тяжести, определяемой по закону Архимеда; T – торможения, зависящей от числа Рейнольдса:

$$G = \Delta W g(\rho - \rho_в); \tag{2.1}$$

$$T = \psi \rho_в \theta^2 d^2, \tag{2.2}$$

где $\Delta W = \dfrac{\pi d^3}{6}$ – объем частиц; ρ, $\rho_в$ – плотности материала частицы и воды; ψ – коэффициент сопротивления.

Из условия равновесия $G = T$ получаем значение гидравлической крупности частицы

$$\theta = \sqrt{\frac{\pi}{6} d \frac{\rho - \rho_в}{\rho_в} g \frac{1}{\psi}}. \quad (2.3)$$

Коэффициент сопротивления в общем виде зависит от формы частицы и от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\theta d \rho_в}{\mu}, \quad (2.4)$$

где μ – коэффициент вязкости воды.

Для ламинарного режима ($Re \le 2$), $\psi = \frac{3\pi}{Re}$, а формула (2.3) преобразуется в формулу Стокса

$$\theta = \frac{1}{18} g \frac{\rho - \rho_в}{\mu} d^2. \quad (2.5)$$

При турбулентном режиме коэффициент сопротивления мало зависит от Re и формула (2.3) может быть записана в виде формулы Реттингера

$$\theta = K \sqrt{g \frac{\rho - \rho_в}{\rho_в} d}, \quad (2.6)$$

где K = 0,12 – 0,23 – экспериментальный коэффициент.

Анализируя формулу (2.3), заключаем, что гидравлическая крупность частицы зависит от ее размеров (в общем случае и от ее формы), плотности материала, температуры воды, влияющей на вязкость. Процесс осаждения вполне характеризуется числами Рейнольдса и Фруда: первое из них представляет отношение единичных (отнесенных к единице массы) сил инерции к силам вязкости, а второе – сил инерции к силам тяжести. Число Фруда в рассматриваемом случае определяется по формуле

$$Fr = \frac{\theta^2 \rho_в}{d(\rho - \rho_в) g}. \quad (2.7)$$

Для ламинарного режима осаждения расчет гидравлической крупности частиц ГДП с достаточной точностью выполняется по формуле Стокса, но при турбулентном режиме в расчетах трудно применить формулу Реттингера, так как коэффициент *K* должен находиться экспериментально. В этом случае расчетное значение гидравлической крупности рекомендуется определять на основании критериев подобия процесса осаждения. Принимается, что гидравлические крупности двух разных частиц одной формы одинаковы, если для них одинаковы значения чисел Архимеда и Лященко. Эти числа получены из чисел Рейнольдса и Фруда:

$$Ar = \frac{\mathrm{Re}^2}{Fr} = \frac{d^3(\rho - \rho_в)\rho_в g}{\mu^2}; \tag{2.8}$$

$$Ly = \mathrm{Re}\,Fr = \frac{\theta^3 \rho_в^2}{\mu(\rho - \rho_в)g}. \tag{2.9}$$

Выразим из формул (2.8) и (2.9) значение θ

$$\theta = \sqrt[3]{\frac{Ly \cdot \mu(\rho - \rho_в)g}{\rho_в^2}}. \tag{2.10}$$

На рис. 2.1 приведен экспериментальный график зависимости критерия Лященко от числа Архимеда для ГДП разной формы [79]. Разнообразие форм частиц требует определение зависимости $Ly = f(Ar)$ в каждом конкретном случае. Использование графиков по ориентировочным соображениям приводит к приблизительным результатам расчетов. Определение гидравлической крупности производится в следующей последовательности:

– по известным значениям d, ρ, μ и по (2.9) определяется число Архимеда;

– по рис. 2.1 в зависимости от известной формы частиц находится значение числа Лященко;

– по формуле (2.10) находится гидравлическая крупность частицы.

Определение гидравлической крупности частиц расчетом дает весьма условные результаты. Более достоверное значение гидравлической крупности может быть получено только экспериментальным путем.

В табл. 2.1 приведены ориентировочные значения гидравлических крупностей некоторых грубодисперсных примесей, содержащихся в природных водах.

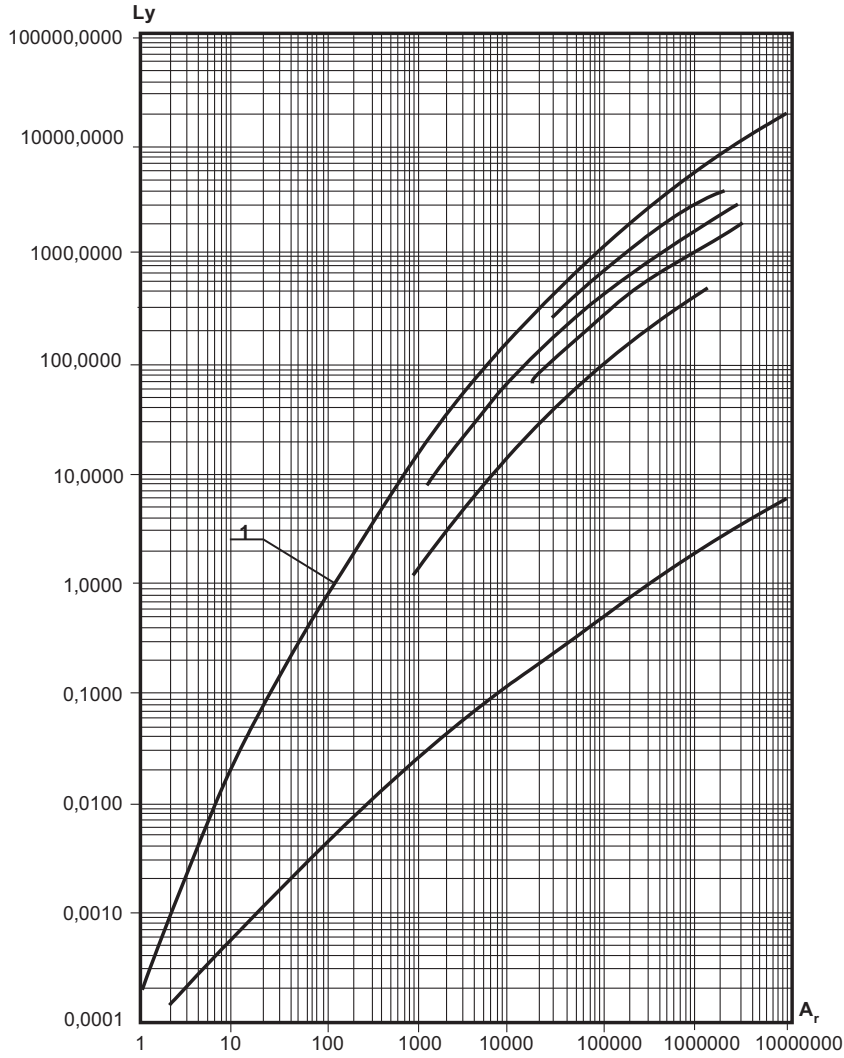


Рис. 2.1. Зависимость критериев Re и Ly от критерия Ar для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде: *1* и *6* – шарообразные частицы; *2* – округленные; *3* – угловатые; *4* – продолговатые; *5* – пластинчатые

Во время эксплуатации очистных сооружений температура воды может изменяться и это существенно сказывается на значениях гидравлических крупностей частиц, так как изменяется коэффициент вязкости μ. Влияние температур особенно существенно при ламинарном режиме осаждения форм. (2.5). В условиях турбулентного режима осаждения влияние температур снижается. Например, для данных табл. 2.1 (T = 20 °С) и при изменении температуры воды до +10 °С гидравлическая крупность ила и глины (ламинарное осаждение) уменьшится в 1,3 раза, а крупность песка – в 1,1 раза.

Таблица 2.1

Значения гидравлических крупностей некоторых ГДП (T = +20 °С)

Примеси	Режим осаждения	Размер частиц, см	θ, мм/с	Продолжительность осаждения на 1 м
Песок крупный Песок средний Песок мелкий	Турбулентный	10^{-1} $5\cdot10^{-2}$ 10^{-2}	100 50 7	10 с 20 с 2,5 мин
Ил крупный Ил мелкий	Ламинарный	$4\cdot10^{-3}$ $10^{-3}\div0,5\cdot10^{-3}$	1,7÷0,5 0,07÷0,017	10÷30 мин 4÷16 ч
Глина крупная Глина тонкая	Ламинарный	$2,7\cdot10^{-4}$ $10^{-4}\div5\cdot10^{-5}$	0,005 0,0007÷0,0001	2÷3 сут 17÷116 сут

Гидравлическая крупность частиц является расчетной величиной при решении тех инженерных задач, в которых рассматривается разделение грубодисперсных частиц по их размерам. К подобным задачам относятся: определение самоочищающей скорости, обеспечивающей поддержание во взвешенном состоянии частиц с заранее принятым диаметром и более мелких; расчет песколовок, предназначенных для задержания частиц диаметрами больше минимально допустимых; и др. Показатель гидравлической крупности, как характеристика частиц определенных размеров, формы и материала, используется при расчетах гидроциклонов, процеживателей и некоторых других установок, о которых будет сказано ниже.

2.1.2. Кинетика осаждения полидисперсной взвеси

В обычных условиях загрязненная вода содержит частицы с разной гидравлической крупностью, т. е. полидисперсные ГДП. В этих условиях бессмысленно ориентироваться на гидравлическую крупность тех или

иных конкретных частиц. Для практических целей (расчет очистного сооружения) важно установить связь между длительностью осаждения и достигаемым эффектом очистки, т. е. кинетику процесса. Такой экспериментальный график приведен на рис. 2.2.

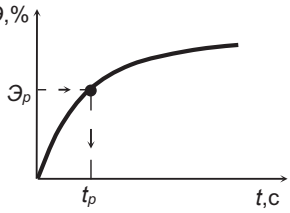


Рис. 2.2. График кинетики осаждения ГДП

Из рисунка следует, что эффект очистки особенно быстро увеличивается в начале процесса, когда в осадок выпадают фракции, имеющие наибольшую гидравлическую крупность.

Каждому значению эффекта соответствует своя продолжительность отстаивания. Так, значению $Э_p$ – продолжительность t_p. Если толщина слоя воды, в котором происходило отстаивание h, то средняя скорость осаждения

$$U = \frac{h}{t_p} . \qquad (2.11)$$

Эта скорость называется расчетной гидравлической крупностью (в дальнейшем – гидравлической крупностью). В отличие от θ, она не является технологической характеристикой конкретной частицы, а оценивает качество воды с точки зрения достигаемого эффекта очистки. Для устойчивой и не способной к слипанию (агрегации) полидисперсной взвеси гидравлическая крупность U не зависит от толщины слоя воды, так как с увеличением h пропорционально возрастает и продолжительность отстаивания t при $Э$ = *const*. В данном случае справедлива зависимость

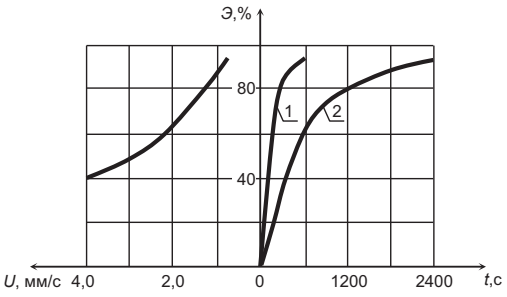


Рис. 2.3. Кривые выпадения взвеси и сводный график $U = f(Э)$ по Д. М. Минцу: *1* – h = 400 мм; *2* – h = 1600 мм

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{t_1}{t_2}, \qquad (2.12)$$

где h_1, h_2 – толщина слоя воды; t_1, t_2 – продолжительности отстаивания в этих слоях при условии постоянного значения эффекта отстаивания.

На рис. 2.3 приведены экспериментальные графики $Э = f(t)$ для разных значений h (исследовалась одна и та же вода). При определении гидравлической крупности по формуле (2.11) во всех случаях получается единый график $U = f(Э)$.

Формально гидравлическую крупность можно представить как гидравлическую крупность частиц такой однородной (монодисперсной) взвеси, для которой при той же высоте столба воды и одинаковой продолжительности отстаивания достигается одинаковый эффект очистки [44].

Для полидисперсной и слипающейся взвеси во время отстаивания происходит когезия частиц и образование агрегатов с большей гидравлической крупностью. Такие условия наблюдаются при отстаивании городских сточных вод, содержащих агрегатирующиеся примеси, и природных вод после реагентной обработки (коагуляции, флокуляции).

Механизм агрегации предусматривает контакт между частицами и их слипание. Вероятность контакта увеличивается с ростом концентрации ГДП и продолжительности процесса, а слипание зависит от свойств взвеси.

Исследование процесса отстаивания воды, содержащей полидисперсные и агрегатирующиеся ГДП, показало, что вместо формулы (2.12) следует применять экспериментальную зависимость

$$\left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{n_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right), \qquad (2.13)$$

где n_2 – показатель степени, зависящий от условий агрегации и определяемый экспериментально, $1 \geq n_2 \geq 0$.

Чем интенсивнее происходит агрегация, тем меньше n_2; показатель равен единице, если агрегация вообще отсутствует. Тогда формула (2.13) превращается в формулу (2.12).

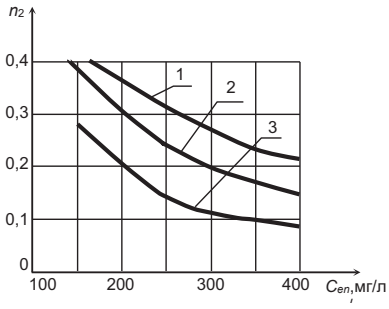


Рис. 2.4. Зависимость n_2 от C_{en} и $Э$ [19]: *1* – $Э$ = 60 %; *2* – $Э$ = 50 %; *3* – $Э$ = 70 %

После реагентной обработки природных вод n_2 = 0,2 ÷ 0,5. При очистке городских сточных вод показатель n_2 зависит от концентрации взвесей в исходной воде и от требуемого эффекта очистки (рис. 2.4).

В графике отражены интересные особенности процесса агрегации загрязнений при отстаивании сточных вод. С увеличением концентрации загрязнений процесс агрегации усиливается, так как по-

вышается вероятность контакта между частицами, что необходимо для их слипания. Показатель n_2 при этом естественно уменьшается. При 50 % эффекте очистки осаждается основная масса загрязнений и при дальнейшем отстаивании с доведением эффекта очистки до 60 % условия агрегации (усредненные для всего процесса) ухудшаются, а n_2 увеличивается. Очистка с 70%-м эффектом требует более длительного (в 2–3 раза большего, чем при эффекте 60 %) отстаивания.

Поэтому та тенденция, которая отмечалась в случае 60 % очистки, изменяется и осредненные условия агрегации оказываются при 70 % благоприятнее не только для 60 %, но и для 50 % эффекта, что выражается в меньших значениях n_2.

В связи с тем, что у агрегатирующихся частиц высота столба воды, в котором происходит отстаивание, влияет на значение U, лабораторные исследования по получению расчетного значения гидравлической крупности унифицируются: высота столба воды принимается равной 500 мм.

Пересчет гидравлической крупности на другую высоту столба воды производится по зависимости, полученной из формул (2.11) и (2.13):

$$U = \frac{h\alpha_t}{t_0\left(\frac{h}{h_0}\right)^{n_2}}, \qquad (2.14)$$

где h – высота столба воды, для которого производится пересчет; h_0 – то же для условий эксперимента по определению гидравлической крупности (h_0 = 500 мм); t_0 – продолжительность отстаивания в условиях эксперимента при достижении требуемого эффекта очистки; α_t – коэффициент, учитывающий температуру воды во время эксперимента и при пересчете для других температур

$$\alpha_t = \frac{\mu_0}{\mu_t}, \qquad (2.15)$$

где μ_0 и μ_t – коэффициент вязкости воды при температурах для условий эксперимента и пересчета.

Формула (2.15) (как следует из нашего случая п. 2.1.1) справедлива для ламинарного режима осаждения. При турбулентном режиме осаждения влияние температур будет сказываться в меньшей степени.

Известны попытки обобщения данных экспериментов по изучению кинетики осаждения ГДП разных видов загрязненной воды.

Выяснилось, что обобщенные данные для однотипных загрязненных вод оказываются мало достоверны, так как в конкретных случаях факторы, определяющие кинетику осаждения, чрезвычайно индивидуальны и их влияние объективно оценивается лишь экспериментальным путем.

При больших концентрациях ГДП (свыше 500–1000 мг/л) и в условиях интенсивной агрегации происходит стесненное осаждение, которое характеризуется взаимным торможением оседающих хлопьев.

На первом этапе процесса возникает расслоение и отделение массы хлопьев от воды с образованием поверхности раздела. Скорость осаждения, которая сначала изменяется мало и может считаться постоянной, по мере сближения хлопьев постепенно замедляется. Чем выше концентрация ГДП, тем сильнее взаимное торможение и меньше скорость стесненного осаждения. Например, при отстаивании активного ила аэротенков с концентрацией сухого вещества 1,0 г/л скорость равна 6,0 м/ч, а с концентрацией 4,0 г/л она не превышает 1,8 м/ч.

Когда хлопья образуют сплошную структуру, стесненное осаждение завершится и начнется гравитационное уплотнение осадка, с уменьшением пористости и вытеснением из него воды.

Явление стесненного осаждения наблюдается на начальном этапе гравитационного уплотнения осадков, в частности образующихся при очистке воды, и в технологических процессах с использованием псевдосжиженных материалов или осадков (см. п. 3.5).

? Контрольные вопросы

1. Что называется гидравлической крупностью частицы ГДП?
2. Какие факторы влияют на величину гидравлической крупности частицы?
3. Почему формула Стокса для определения гидравлической крупности частицы пригодна только для ламинарного режима осаждения?
4. Почему метод определения гидравлической крупности частицы на основании процесса осаждения в конкретных случаях требует экспериментального уточнения?
5. Что называется расчетной гидравлической крупностью и каково ее различие с гидравлической крупностью частицы?
6. В каких случаях толщина слоя воды влияет на расчетную гидравлическую крупность, как и почему?

2.1.3. Процесс седиментации в отстойниках

По режиму работы отстойники делятся на установки постоянного и периодического действия. В последнем случае отстаивание производится в неподвижной воде. Расчет отстойников периодического действия сводится к определению продолжительности пребывания в них воды. На основании формулы (2.13) продолжительность составит

$$t = t_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^{n_2} \frac{1}{\alpha_t}. \qquad (2.16)$$

Отстойники постоянного действия в зависимости от направления движения воды могут быть вертикальными и горизонтальными. Элементарная схема осаждения грубодисперсных частиц в отстойниках представлена на рис. 2.5.

В вертикальном отстойнике скорость движения частиц является равнодействующей двух скоростей: восходящей скорости потока и гидравлической крупности. Все частицы, гидравлическая крупность которых больше восходящей скорости, осаждаются, а частицы, у которых она меньше – выносятся из отстойника. В расчетах восходящая скорость потока V принимается равной расчетной гидравлической крупности, отвечающей требуемому эффекту очистки, т. е. $V = U$. В горизонтальном отстойнике частица загрязнения перемещается по диагонали прямоугольника скоростей – горизонтальной составляющей скорости потока V и гидравлической крупности. Как следует из рис. 2.5, при расчетном значении гидравлической крупности U частица осядет на дно отстойника на расстоянии L от входа. Из подобия треугольников следует, что

$$\frac{V}{U} = \frac{L}{h}. \qquad (2.17)$$

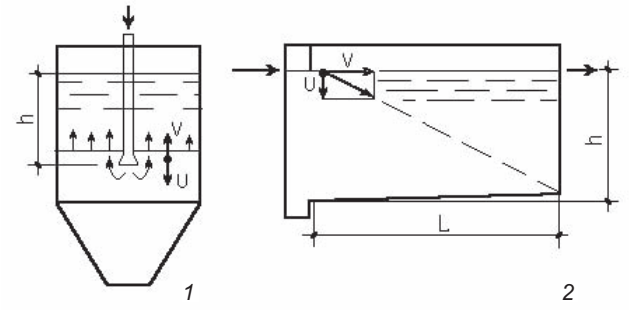


Рис. 2.5. Схема осаждения в отстойниках:
1 – вертикальный; *2* – горизонтальный

Все частицы, гидравлическая крупность которых превышает расчетную, выпадут в осадок на расстоянии от входа меньшем, чем L, а частицы, имеющие меньшую гидравлическую крупность, будут из отстойника выноситься. В реальных условиях процесс осаждения в отстойниках отличается от рассмотренной схемы. Это объясняется, во-первых, пульсацией скоростей в потоке, свойственной турбулентному режиму движения, а во-вторых, неравномерным распределением скоростей и вихреобразованиями в отстойниках, как результатом гидравлического несовершенства последних.