

А. В. КОЗАЧЕК

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ
ОКРУЖАЮЩЕЙ
СРЕДЫ**

Часть I

Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А. В. КОЗАЧЕК

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Часть I

Утверждено Учёным советом университета
в качестве практикума для студентов 2 – 4 курсов
направлений 05.03.06, 20.03.01, 20.04.01
очной и заочной форм обучения

Учебное издание



Тамбов
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
2019

ББК 20.1
УДК 628
К59

Р е ц е н з е н т ы :

Кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры
«Химия и химические технологии» ФГБОУ ВО «ТГТУ»
Н. А. Абакумова

Кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры «Природо-
пользование и землеустройство»
ФГБОУ ВО «ТГУ им. Г. Р. Державина»
Е. В. Малышева

Козачек, А. В.

К59 Теоретические основы защиты окружающей среды : практикум /
А. В. Козачек. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»,
2019. – 120 с. – Ч. I. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-2154-0

Охватывает часть курса, посвящённую особенностям расчётов технологических процессов промышленной экологии, применяемых в системах очистки газопылевых выбросов, сточных вод, переработки отходов. Даны методы решения практических ситуаций, необходимые студенту для более глубокого усвоения дисциплин «Основы промышленной экологии», «Промышленная экология», «Рациональное водопользование и очистка сточных вод», «Обращение с отходами производства и потребления», «Технологии защиты атмосферы», «Теоретические основы комплексной защиты окружающей среды», «Современные технологии очистки сточных вод и газовых выбросов». Представлен практический материал с решением примеров и задач по каждой теме, а также задания для самостоятельной работы студентов.

Предназначен для студентов 2 – 4 курсов направлений 05.03.06, 20.03.01, 20.04.01 очной и заочной форм обучения.

ББК 20.1
УДК 628

ISBN 978-5-8265-2122-9 (общ.)
ISBN 978-5-8265-2154-0 (Ч. I)

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2019

ВВЕДЕНИЕ

Практикум охватывает часть курса, посвящённую особенностям расчётов технологических процессов промышленной экологии, применяемых в системах очистки газопылевых выбросов, сточных вод, переработки отходов.

Даны методы решения практических ситуаций, необходимые студенту для более глубокого усвоения дисциплин «Основы промышленной экологии», «Промышленная экология», «Рациональное водопользование и очистка сточных вод», «Обращение с отходами производства и потребления», «Технологии защиты атмосферы», «Теоретические основы комплексной защиты окружающей среды», «Современные технологии очистки сточных вод и газовых выбросов».

Для лучшего понимания предмета представлен практический материал с решением примеров и задач по каждой теме, а также задания для самостоятельной работы студентов.

Практикум предназначен для студентов 2-4 курсов направлений 05.03.06, 20.03.01, 20.04.01 очной и заочной форм обучения.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОБРАЗОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Теоретические основы классификации и причины появления загрязнений

Загрязнение – это неблагоприятное изменение окружающей среды, которое целиком или частично является результатом человеческой деятельности, прямо или косвенно меняет распределение приходящей энергии, уровня радиации, физико-химические свойства окружающей среды и условия существования живых существ, ухудшая их здоровье.

Примеси – твёрдые, жидкие и газообразные загрязняющие вещества, растворённые или нерастворённые (взвешенные) в окружающей их среде.

Загрязнения классифицируют на:

1) материальные (жидкие, твёрдые, газообразные, смешанные примеси):

- в газовых выбросах;
- в сточных водах;
- в твёрдых веществах и отходах;

2) энергетические:

– ионизирующие излучения (радиация);
– световые, инфракрасные, ультрафиолетовые, лазерные излучения;

– электромагнитные поля;

– шум, вибрация, ультразвук, инфразвук;

– тепловые выбросы [6, с. 19];

3) специфические:

– эстетические и архитектурные;

– дорожно-строительные и градостроительные;

– ландшафтные.

Загрязнённые системы могут быть однородными и неоднородными.

Неоднородными (гетерогенными, полидисперсными) системами называют системы, состоящие из двух или нескольких фаз. Фазы, составляющие систему, могут быть, в принципе, механически отделены одна от другой.

Любая неоднородная система состоит из дисперсной (внутренней) фазы (частицы вредных и безвредных примесей) и дисперсионной среды (сплошной, внешней фазы, жидкости, воздуха, твёрдого вещества), в которой распределены частицы дисперсной фазы.

К дисперсной фазе относятся такие примеси, как твёрдые частицы вредных веществ, капли вредных жидкостей, пузырьки вредных газов.

В зависимости от физического состояния дисперсных фаз различают следующие основные виды гетерогенных систем.

Суспензии (взвеси) – неоднородные системы, состоящие из жидкости и взвешенных в ней твёрдых частиц вредных примесей. В зависимости от размеров твёрдых частиц суспензии условно подразделяют на *грубые* (более 100 мкм), *тонкие* (0,5...100 мкм) и *мути* (0,1...0,5 мкм) или соответственно грубодисперсные, тонкодисперсные и мелкодисперсные суспензии.

Коллоидные растворы – системы, в которых размеры частиц, находящихся в жидкости, являются средними между размерами молекул и частиц суспензий.

Эмульсии – системы, состоящие из жидкости и распределённых в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой.

Пульты – системы, состоящие из малого количества жидкости и большого количества твёрдых частиц, но сохраняющие свою текучесть.

Пены – системы, состоящие из жидкости и распределённых в ней пузырьков газа.

Аэрозоли – аэродисперсные системы. Они подразделяются на:

а) *пыли* – системы, состоящие из газа и распределённых в нём частиц твёрдого вещества размером 5...10 мкм и образующиеся обычно при механическом распределении частиц в газе;

б) *дымы* – системы, состоящие из газа и распределённых в нём частиц твёрдого вещества размером 0,1...5 мкм и образующиеся в процессах конденсации паров (газов) при переходе их в жидкое или твёрдое состояние;

в) *туманы* – системы, состоящие из газа и распределённых в нём частиц жидкости размером 0,3...5 мкм.

Руды – системы, состоящие из твёрдой дисперсионной среды и находящихся в ней твёрдых частиц примесей [5, с. 17].

Грунты (почвы) – системы, состоящие из твёрдой дисперсионной среды и частиц жидкости в ней [5, с. 17].

Пористые системы – системы, состоящие из твёрдой дисперсионной среды и пузырьков воздуха.

Однородными (гомогенными) системами называются системы, состоящие из основной среды, в которой примеси других веществ находятся в растворённом раздробленном состоянии или на микроуровне в виде молекул, атомов и ионов. К однородным системам относятся:

- *сплавы* – системы твёрдое вещество–твёрдое вещество;
- *растворы* – системы, в которых твёрдые, газовые или жидкие вещества растворены в жидкости;
- *хемосорбционные системы* – системы, в которых газ растворён в твёрдом веществе;
- *смеси* – системы газ–газ.

Шлам – частицы примесей дисперсной фазы, отделённые от дисперсионной среды в результате реализации процесса очистки.

В зависимости от агрегатного состояния дисперсионные среды, содержащие загрязняющие вещества, можно подразделить на:

1) *газопылевые выбросы* – это системы, состоящие из организованно отходящего из выхлопных и дымовых труб или неорганизованно выходящего газа и распределённых в нём загрязняющих веществ и образующиеся в процессах пыления, сжигания, трения и т.д.;

2) *сточные воды* – это жидкие комплексные вещества, загрязнённые бытовыми и производственными отбросами, примесями и другими вредными веществами, и удаляемые с территорий населённых мест и промышленных предприятий системами канализации. К сточным водам относят также воды, образующиеся в результате выпадения атмосферных осадков в пределах территорий населённых пунктов и промышленных объектов;

3) *отходы* – материальные продукты общественного производства и потребления, которые произведены человеком из природных ресурсов, но по каким-либо причинам не используются человеком для удовлетворения своих потребностей.

Причины появления загрязнений:

- наличие примесей в исходной среде, которые остаются в продукте на выходе;
- выделение в процессе физико-химических превращений различных видов энергии, негативно воздействующих на окружающую среду;

- протекание в процессе физико-химического взаимодействия не только основных, но и побочных химических реакций, в результате чего образуются побочные химические продукты, которые становятся загрязнителями;
- степень превращения исходного сырья в конечный продукт может быть менее 100% , т.е. какое-то количество сырья не превращается вообще, либо превращается в другой нежелательный продукт;
- нерациональное использование веществ и энергии на производстве.

Примеры расчёта количественных характеристик образующихся загрязнённых систем

Ситуация. На мебельной фабрике реализована схема производства деревянных настенных европанелей с рисунком. Схема включает стадию механической обработки древесины, стадию склеивания панелей и стадию отделки склеенных панелей. Среднечасовое количество опилок, стружек и древесной пыли, выделяющихся на стадии механической обработки, равно 280 кг/ч, содержание древесной пыли (частиц диаметром менее 200 мкм) в общем количестве деревянных отходов, составляет 30%, коэффициент эффективности работы местной вытяжной системы – 0,9. На стадии склеивания панелей применяется карбамидоформальдегидная смола КФ-МП, содержащая формальдегид: расход смолы – 500 кг/ч, содержание свободного формальдегида в составе смолы составляет 0,3%; коэффициенты, характеризующие распределение вредных веществ по участкам: $k_2 = 0,6$, $k_3 = 0,9$. На стадии отделки склеенных панелей применяется растворитель РКБ-1, содержание в растворителе бутанола – 50%, ксилола – 50%.

Определить общее количество вредных веществ, выделяемых фабрикой в атмосферу.

Дано: $G_0 = 280$ кг/ч, $a_{д.п} = 30\%$, $k_{э.м.о} = 0,9$, $G_{см} = 500$ кг/ч, $a_{ф} = 0,3\%$, $k_2 = 0,6$, $k_3 = 0,9$, $G_{м} = 20$ кг/ч, $a_{б} = 50\%$, $a_{к} = 50\%$.

Найти: M .

Рекомендуемый ход решения. Общее количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу,

$$M = M_{п} + M_{ф} + M_{б} + M_{к}.$$

Количество древесной пыли, выбрасываемой в атмосферу на первой стадии,

$$M_{\text{п}} = G_{\text{о}} k_{\text{п}} k_{\text{э.м.о.}}$$

Коэффициент содержания древесной пыли в общем количестве древесных отходов:

$$k_{\text{п}} = \frac{a_{\text{п}}}{100\%}, \quad k_{\text{п}} = \frac{30}{100} = 0,3.$$

Тогда

$$M_{\text{п}} = 28 \cdot 0,3 \cdot 0,9 = 7,56 \frac{\text{кг пыли}}{\text{ч}}.$$

Количество формальдегида, выбрасываемого в атмосферу на второй стадии,

$$M_{\text{ф}} = G_{\text{см}} k_1 (1 - k_2) k_3.$$

Коэффициент содержания формальдегида в составе смолы:

$$k_1 = \frac{a_{\text{ф}}}{100\%}, \quad k_1 = \frac{0,3}{100} = 0,003.$$

Тогда

$$M_{\text{ф}} = 500 \cdot 0,003 \cdot (1 - 0,6) \cdot 0,9 = 0,54 \frac{\text{кг форм}}{\text{ч}}.$$

Количество бутанола, выбрасываемого в атмосферу на третьей стадии,

$$M_{\text{б}} = G_{\text{м}} k_{\text{к.б}} 0,8.$$

Коэффициент содержания бутанола в растворителе:

$$k_{\text{к.б}} = \frac{a_{\text{б}}}{100\%}, \quad k_{\text{к.б}} = \frac{50}{100} = 0,5.$$

Тогда

$$M_{\text{б}} = 20 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 8 \frac{\text{кг бутанола}}{\text{ч}}.$$

Количество ксилола, выбрасываемого в атмосферу на третьей стадии,

$$M_{\text{к}} = G_{\text{м}} k_{\text{к}} 0,8.$$

Коэффициент содержания ксилола в растворителе:

$$k_k = \frac{a_k}{100\%}, \quad k_k = \frac{50}{100} = 0,5.$$

Тогда

$$M_k = 20 \cdot 0,5 \cdot 0,8 = 8 \frac{\text{КГ КСИЛОЛА}}{\text{Ч}};$$

$$M = 7,56 + 0,54 + 8 + 8 = 24,1 \frac{\text{КГ ВР. В-В}}{\text{Ч}}.$$

$$\text{Ответ: } M = 24,1 \frac{\text{КГ ВР. В-В}}{\text{Ч}}.$$

Ситуация. На городские очистные канализационные сооружения поступают сточные воды. Общий сток сточных вод включает хозяйственно-бытовые сточные воды от населения, производственные сточные воды с промышленных предприятий города. Суточный приток производственных сточных вод – 24 000 м³/сут, средний суточный расход бытовых сточных вод – 43 200 м³/сут. Расчётное население города – 216 000 человек. Канализуемый объект расположен в средней полосе Российской Федерации, для которой: норма среднесуточного водоотведения на одного жителя – 200 л/сут; масса взвешенных веществ в бытовых сточных водах на одного жителя – 65 г/сут; биохимическая потребность в кислороде полная в бытовых сточных водах на одного жителя – 40 г/сут; содержание нефтепродуктов в бытовых сточных водах на одного жителя – 0 г/сут; содержание синтетических поверхностно-активных веществ в бытовых сточных водах на одного жителя – 2,5 г/сут. Производственные сточные воды содержат взвешенных веществ 250 г/м³, нефтепродуктов 20 г/м³, синтетических поверхностно-активных веществ 22 г/м³ и имеют биохимическую потребность в кислороде за 20 суток, равную 140 г/м³.

Определить концентрации загрязнений в сточных водах, поступающих на городские очистные канализационные сооружения, и приведённое население по этим загрязнениям.

Дано: $Q_{\text{ср. сур}}^{\text{п}} = 24\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$, $Q_{\text{ср. сур}}^{\text{б}} = 43\,200 \text{ м}^3/\text{сут}$, $N = 216\,000 \text{ чел.}$,
 $n = 200 \text{ л/сут}$, $b'_6 = 65 \text{ г/сут}$; $L'_6 = 40 \text{ г/сут}$, $C'_6 = 0 \text{ г/сут}$, $K'_6 = 2,5 \text{ г/сут}$,
 $b_{\text{п}} = 250 \text{ г/м}^3$, $C_{\text{п}} = 20 \text{ г/м}^3$, $K_{\text{п}} = 22 \text{ г/м}^3$, $L_{\text{п}} = 140 \text{ г/м}^3$.

Найти: b , L , C , K , $N_{\text{пр}}^{\text{в}}$, $N_{\text{пр}}^{\text{л}}$.

Рекомендуемый ход решения. Концентрация взвешенных веществ в общем стоке сточных вод [13, с. 18]

$$b = \frac{b Q_{\text{ср. сут}}^{\text{б}} + b_{\text{п}} Q_{\text{ср. сут}}^{\text{п}}}{Q_{\text{ср. сут}}}.$$

Концентрация взвешенных веществ в хозяйственно-бытовых сточных водах [13, с. 18]:

$$b = \frac{b'_{\text{б}}}{n} \cdot 1000, \quad b = \frac{65}{200} \cdot 1000 = 325 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Среднесуточный суммарный расход бытовых и производственных сточных вод [13, с. 16]:

$$Q_{\text{ср. сут}} = Q_{\text{ср. сут}}^{\text{б}} + Q_{\text{ср. сут}}^{\text{п}};$$

$$Q_{\text{ср. сут}} = 43\,200 + 24\,000 = 67\,200 \frac{\text{м}^3}{\text{сут}}.$$

Тогда

$$b = \frac{325 \cdot 43\,200 + 250 \cdot 24\,000}{67\,200} = 298 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Биохимическая потребность в кислороде полная, в общем стоке сточных вод [13, с. 19]

$$L = \frac{L_{\text{б}} Q_{\text{ср. сут}}^{\text{б}} + L_{\text{п}} Q_{\text{ср. сут}}^{\text{п}}}{Q_{\text{ср. сут}}}.$$

Биохимическая потребность в кислороде полная в хозяйственно-бытовых сточных водах [13, с. 18]:

$$L_{\text{б}} = \frac{L'_{\text{б}}}{n} \cdot 1000, \quad L_{\text{б}} = \frac{40}{200} \cdot 1000 = 200 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Тогда

$$L = \frac{200 \cdot 43\,200 + 140 \cdot 24\,000}{67\,200} = 179 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}.$$

Содержание нефтепродуктов в общем стоке сточных вод [13, с. 19]

$$C = \frac{C_6 Q_{\text{ср.сут}}^6 + C_{\text{п}} Q_{\text{ср.сут}}^{\text{п}}}{Q_{\text{ср.сут}}}$$

Содержание нефтепродуктов в хозяйственно-бытовых сточных водах:

$$C_6 = \frac{C'_6}{n} \cdot 1000, \quad C_6 = \frac{0}{200} \cdot 1000 = 0 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$$

Тогда

$$C = \frac{0 \cdot 43\,200 + 20 \cdot 24\,000}{67\,200} = 7,15 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$$

Содержание синтетических поверхностно-активных веществ в общем стоке сточных вод [13, с. 19]

$$K = \frac{K_6 Q_{\text{ср.сут}}^6 + K_{\text{п}} Q_{\text{ср.сут}}^{\text{п}}}{Q_{\text{ср.сут}}}$$

Содержание синтетических поверхностно-активных веществ в хозяйственно-бытовых сточных водах [13, с. 19]:

$$K_6 = \frac{K'_6}{n} \cdot 1000, \quad K_6 = \frac{2,5}{200} \cdot 1000 = 12,5 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$$

Тогда

$$K = \frac{12,5 \cdot 43\,200 + 22 \cdot 24\,000}{67\,200} = 15,9 \frac{\text{г}}{\text{м}^3}$$

Приведённое население города по взвешенным веществам [13, с. 20]

$$N_{\text{пр}}^{\text{в}} = N + N_{\text{эkv}}^{\text{в}}$$

Эквивалентное население города по взвешенным веществам [13, с. 20]:

$$N_{\text{эkv}}^{\text{в}} = \frac{b_{\text{п}} Q_{\text{ср.сут}}^{\text{п}}}{b_6}, \quad N_{\text{эkv}}^{\text{в}} = \frac{250 \cdot 24\,000}{65} = 92\,308 \text{ чел.}$$

Тогда

$$N_{\text{пр}}^{\text{в}} = 216\,000 + 92\,308 = 308\,308 \text{ чел.}$$

Приведённое население города по биохимической потребности в кислороде полной [13, с. 20]

$$N_{\text{пр}}^L = N + N_{\text{экв}}^L.$$

Эквивалентное население города по биохимической потребности в кислороде [13, с. 20]:

$$N_{\text{экв}}^L = \frac{L_{\text{п}} Q_{\text{ср. сут}}^{\text{п}}}{L_{\text{б}}}, \quad N_{\text{экв}}^L = \frac{140 \cdot 24000}{40} = 84000 \text{ чел.}$$

Тогда

$$N_{\text{пр}}^L = 216000 + 84000 = 300000 \text{ чел.}$$

Ответ: $b = 298 \text{ г/м}^3$, $L = 179 \text{ г/м}^3$, $C = 7,15 \text{ г/м}^3$, $K = 15,9 \text{ г/м}^3$,
 $N_{\text{пр}}^{\text{в}} = 308308 \text{ чел.}$, $N_{\text{пр}}^L = 300000 \text{ чел.}$

Ситуация. На руднике происходит разделение породы в отсадочной машине с образованием твёрдых отходов. Содержание тяжёлых частиц в питании составляет 70%, производительность отсадочной машины – 1000 т/ч, средняя насыпная плотность материала постели – 5 кг/м^3 , ширина отсадочного отделения – 2 м, длина отсадочной машины – 2 м. Коэффициент пропорциональности, характеризующий удельную скорость разделения, – $0,01 \text{ с}^{-1}$, наибольшая крупность материала питания – 100 мм.

Определить количество тяжёлых частиц твёрдых отходов на выходе из отсадочной машины.

Дано: $F_{\text{вх}} = 70\%$, $Q = 1000 \text{ т/ч}$, $\rho_{\text{нас}} = 5 \text{ кг/м}^3$, $B = 2 \text{ м}$, $L = 2 \text{ м}$,
 $K = 0,01 \text{ с}^{-1}$, $d_{\text{max}} = 100 \text{ мм}$.

Найти: $F_{\text{вых}}$.

Рекомендуемый ход решения. Содержание данной фракции в «чужих» продуктах (количество тяжёлых частиц в верхнем слое лёгких частиц) на выходе из отсадочной машины

$$F_{\text{вых}} = F_{\text{вх}} - \frac{F_{\text{вх}} \eta}{100}.$$

Эффективность обогащения отсадкой

$$\eta = e^{-K\tau}.$$

Время пребывания материала в отсадочной машине

$$\tau = \frac{L}{V_T}.$$

Средняя скорость продольного перемещения материала в отсадочной машине

$$V_T = \frac{Q}{3600 \rho_{\text{нас}} B H}.$$

Высота отсадочной постели при отсадке крупного материала:

$$H = (5 \dots 10) d_{\text{max}} \approx 7,5 \cdot d_{\text{max}}, \quad H = 7,5 \cdot 100 = 750 \text{ мм}.$$

Тогда:

$$V_T = \frac{1000}{3600 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 750 \cdot 10^{-3}} = 0,037 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\tau = \frac{q}{0,037} = 54 \text{ с};$$

$$\eta = e^{-0,01 \cdot 54} = 0,58 = 58\%;$$

$$F_{\text{вых}} = 70 - \frac{70 \cdot 58}{100} = 29,4\%.$$

Ответ: $F_{\text{вых}} = 29,4\%$.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить общее количество вредных веществ M , выделяемых в атмосферу на мебельной фабрике, если на фабрике реализована схема производства деревянных настенных европанелей с рисунком, включающая стадию механической обработки древесины, стадию склеивания панелей и стадию отделки склеенных панелей. Среднечасовое количество опилок, стружек и древесной пыли, выделяющееся на стадии механической обработки, равно $G_o = 280$ кг/ч. Содержание древесной пыли (частиц диаметром менее 200 мкм) в общем количестве деревянных отходов составляет $a_{\text{д.п}} = 30\%$, коэффициент эффективности работы местной вытяжной системы $k_{\text{э.м.о}} = 0,9$. На стадии склеивания панелей применяется карбомидоформальдегидная смола КФ-

МП, содержащая формальдегид: расход смолы $G_{\text{см}} = 500$ кг/ч, содержание свободного формальдегида в составе смолы составляет $a_{\text{ф}} = 0,3\%$; коэффициенты, характеризующие распределение вредных веществ по участкам, $k_2 = 0,6$, $k_3 = 0,9$. На стадии отделки склеенных панелей применяется растворитель РКБ-1, содержание в растворителе бутанола $a_{\text{б}} = 50\%$, ксилола $a_{\text{к}} = 50\%$.

2. Определить концентрации загрязнений b , L , C , K в сточных водах, поступающих на городские очистные канализационные сооружения, и приведённое население города по этим загрязнениям $N_{\text{пр}}^b$, $N_{\text{пр}}^L$.

Общий сток сточных вод включает хозяйственно-бытовые сточные воды от населения и производственные сточные воды с промышленных предприятий города. Суточный приток производственных сточных вод $Q_{\text{ср.сут}}^{\text{п}} = 64\,000$ м³/сут. Средний суточный расход бытовых сточных вод $Q_{\text{ср.сут}}^{\text{б}} = 63\,200$ м³/сут. Расчётное население города $N = 266\,000$ чел. Канализуемый объект расположен в средней полосе Российской Федерации, для которой: норма среднесуточного водоотведения на одного жителя составляет $n = 200$ л/сут; количество взвешенных веществ в бытовых сточных водах на одного жителя $b'_6 = 66$ г/сут; биохимическая потребность в кислороде полная в бытовых сточных водах на одного жителя $L'_6 = 46$ г/сут; содержание нефтепродуктов в бытовых сточных водах на одного жителя $C'_6 = 0$ г/сут; содержание синтетических поверхностно-активных веществ в бытовых сточных водах на одного жителя $K'_6 = 2,6$ г/сут. Производственные сточные воды содержат взвешенных веществ $b_{\text{п}} = 650$ г/м³, нефтепродуктов $C_{\text{п}} = 20$ г/м³, синтетических поверхностно-активных веществ $K_{\text{п}} = 26$ г/м³ и имеют биохимическую потребность в кислороде полную $L_{\text{п}} = 160$ г/м³.

3. Определить концентрации загрязнений b , L , C , K в сточных водах, поступающих на городские очистные канализационные сооружения, и приведённое население города по этим загрязнениям $N_{\text{пр}}^b$, $N_{\text{пр}}^L$.

Общий сток сточных вод включает хозяйственно-бытовые сточные воды от населения и производственные сточные воды с промышленных предприятий города. Суточный приток производственных сточных вод $Q_{\text{ср.сут}}^{\text{п}} = 54\,000$ м³/сут. Средний суточный расход бытовых

сточных вод $Q_{\text{ср.сут}}^{\text{п}} = 53\,200 \text{ м}^3/\text{сут}$. Расчётное население города $N = 516\,000$ чел. Канализируемый объект расположен в средней полосе Российской Федерации, для которой: норма среднесуточного водоотведения на одного жителя составляет $n = 200 \text{ л/сут}$; количество взвешенных веществ в бытовых сточных водах на одного жителя $b'_6 = 55 \text{ г/сут}$; биохимическая потребность в кислороде полная в бытовых сточных водах на одного жителя $L'_6 = 50 \text{ г/сут}$; содержание нефтепродуктов в бытовых сточных водах на одного жителя $C'_6 = 0 \text{ г/сут}$; содержание синтетических поверхностно-активных веществ в бытовых сточных водах на одного жителя $K'_6 = 5,5 \text{ г/сут}$. Производственные сточные воды содержат взвешенных веществ $b_{\text{п}} = 550 \text{ г/м}^3$, нефтепродуктов $C_{\text{п}} = 50 \text{ г/м}^3$, синтетических поверхностно-активных веществ $K_{\text{п}} = 22 \text{ г/м}^3$ и имеют биохимическую потребность в кислороде полную $L_{\text{п}} = 150 \text{ г/м}^3$.

4. Определить количество тяжёлых частиц твёрдых отходов на выходе из отсадочной машины $F_{\text{вых}}$. Содержание тяжёлых частиц в питании составляет $F_{\text{вх}} = 50\%$, производительность отсадочной машины $Q = 2500 \text{ т/ч}$, средняя насыпная плотность материала постели $\rho_{\text{нас}} = 3 \text{ кг/м}^3$, ширина отсадочного отделения $B = 3 \text{ м}$, длина отсадочной машины $L = 5 \text{ м}$. Коэффициент пропорциональности, характеризующий удельную скорость разделения, $K = 0,02 \text{ с}^{-1}$, наибольшая крупность материала питания $d_{\text{max}} = 150 \text{ мм}$.

2. СЕДИМЕНТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

2.1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ СЕДИМЕНТАЦИИ

Общие теоретические основы седиментации

Процесс седиментации основан на различии плотностей дисперсионной среды и частиц дисперсионной фазы. Частицы дисперсионной фазы (примеси) имеют большую плотность, чем дисперсионная среда, благодаря чему сила тяжести, действующая на частицу дисперсионной фазы, становится больше силы выталкивания, и частица движется сверху вниз.

При ламинарном движении, наблюдающемся при небольших скоростях и малых размерах тел или при высокой вязкости среды, тело окружено пограничным слоем (ПС) жидкости и плавно обтекается потоком. Потеря энергии в таких условиях связана лишь с преодолением трения.

При турбулентном движении (например, при увеличении скорости тела) большую роль играют силы инерции, под действием которых пограничный слой отрывается от поверхности тела, что приводит к понижению давления за движущимся телом и к образованию беспорядочных завихрений за ним. При дальнейшем увеличении скорости роль любого сопротивления становится преобладающей, а сопротивлением трения можно пренебречь (наступает автомоделный режим).

С увеличением сопротивления движению частиц уменьшается ускорение частиц. В результате, через короткий промежуток времени наступает равновесие: сила тяжести G , под действием которой частица движется, станет равной силе сопротивления среды R . Начиная с этого момента, ускорение движения равно нулю, и частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью. Скорость такого равномерного движения частиц в среде называется скоростью осаждения $\omega_{ос}$.

Движущей силой процесса отстаивания при этом является разность между силой гравитации G и силой выталкивания V . Преобладание в данном случае силы гравитации и приводит к движению частицы сверху вниз.

Для частицы примеси нешарообразной формы в расчётные формулы вместо величины диаметра d подставляется величина эквивалентного диаметра $d_э$, вычисляемая как диаметр условного шара, объём которого равен объёму тела неправильной формы.

При этом величину $\omega_{ос}$ для частиц нешарообразной формы следует умножить на поправочный коэффициент формы φ . Его значения определяют опытным путём. Примерные значения коэффициента формы для некоторых частиц даны в табл. 1 [1, с. 100–101; 11, с. 25].

1. Коэффициенты формы частиц

Частицы	Коэффициент формы ϕ
Шарообразные	1
Округлые	0,77
Угловатые	0,66
Продолговатые	0,58
Пластинчатые	0,43

Все вышеприведённые особенности действительны как для осаждения твёрдых частиц вредных примесей в жидкой среде (сточной воде), так и в газовой среде (запылённом воздухе).

В случае осаждения капель жидкости в другой жидкой среде, процесс осложняется тем, что форма капель непрерывно меняется.

Примеры расчёта процесса седиментации

Ситуация. На локальных очистных сооружениях строительного предприятия реализуется процесс отстаивания твёрдых частиц песка. Концентрация частиц песка в сточной воде (на входе в отстойник) – 0,2 кг п./кг сл., в осветлённой воде (на выходе из отстойника) – 0,03 кг п./кг сл., в осадке (шлам) после слива осветлённой воды – 0,8 кг п./кг сл. Высота слоя осадка после слива составляет 0,10 м. Скорость отстаивания – 1,2 м/с. Плотность частиц песка – 1500 кг/м³. Площадь сечения аппарата постоянна по его высоте.

Определить время отстаивания частиц песка из сточной воды и эффективность отстаивания.

Дано: $\bar{x}_н = 0,2$ кг п./кг сл., $\bar{x}_к = 0,03$ кг п./кг сл., $\bar{x}_{шл} = 0,8$ кг п./кг сл., $h_{шл} = 0,10$ м, $\omega_{ос} = 1,2$ м/с, $\rho = 1500$ кг/м³, $C_c = 998$ кг/м³, $S = const$.

Найти: $\tau_{ос}$, η .

Рекомендуемый ход решения. Время отстаивания частиц песка

$$\tau_{ос} = h_{ос} / \omega_{ос} .$$

Высота отстаивания (расстояние от штуцера подачи сточной воды до дна отстойника) определяется из уравнения материального баланса при постоянном сечении аппарата

$$h_н(1 - \varepsilon_н) = h_{шл}(1 - \varepsilon_{шл}) + h_к(1 - \varepsilon_к) ,$$

откуда

$$h_{oc} = h_n = \frac{h_{шл}(1 - \varepsilon_{шл}) + h_k(1 - \varepsilon_k)}{1 - \varepsilon_n}.$$

С учетом того, что $h_n = h_k + h_{шл}$, получим

$$h_{oc} = h_n = h_{шл} \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_{шл}}{\varepsilon_k - \varepsilon_n}.$$

Порозность слоя осадка (объёмная доля чистой воды, оставшаяся в шламе после слива осветлённой воды, влажность осадка)

$$\varepsilon_{шл} = 1 - \bar{x}_{шл} \frac{\rho_{сл}^{шл}}{\rho}.$$

Плотность шлама

$$\rho_{сл}^{шл} = \frac{1}{\frac{\bar{x}_{шл}}{\rho} + \frac{1 - \bar{x}_{шл}}{\rho_c}}, \quad \rho_{сл}^{шл} = \frac{1}{\frac{0,8}{1500} + \frac{1 - 0,8}{998}} = 1363 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Тогда

$$\varepsilon_{шл} = 1 - 0,8 \frac{1363}{1500} = 0,27.$$

Начальная порозность слоя твёрдых частиц примесей в сточной воде (объёмная доля чистой воды в сточной воде)

$$\varepsilon_n = 1 - \bar{x}_n \frac{\rho_{сл}^n}{\rho}.$$

Плотность суспензии (сточной воды):

$$\rho_{сл}^n = \frac{1}{\frac{\bar{x}_n}{\rho} + \frac{1 - \bar{x}_n}{\rho_c}}, \quad \rho_{сл}^n = \frac{1}{\frac{0,2}{1500} + \frac{1 - 0,2}{998}} = 1069 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Тогда

$$\varepsilon_n = 1 - 0,2 \frac{1069}{1500} = 0,86.$$

Конечная порозность слоя твёрдых частиц примесей в сточной воде (объёмная доля чистой воды в осветлённой воде)

$$\varepsilon_k = 1 - \bar{x}_k \frac{\rho_{сл}^k}{\rho}.$$

Плотность осветлённой воды

$$\rho_{\text{сл}}^{\text{к}} = \frac{1}{\frac{\bar{x}_{\text{к}}}{\rho} + \frac{1 - \bar{x}_{\text{к}}}{C_{\text{с}}}}, \quad \rho_{\text{сл}}^{\text{к}} = \frac{1}{\frac{0,03}{1500} + \frac{1 - 0,03}{998}} = 1008 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Тогда

$$\varepsilon_{\text{к}} = 1 - 0,03 \frac{1008}{1500} = 0,98;$$

$$h_{\text{ос}} = h_{\text{н}} = 0,1 \frac{0,98 - 0,27}{0,98 - 0,86} = 0,59 \text{ м};$$

$$\tau_{\text{ос}} = \frac{0,59}{0,2} = 2,95 \text{ с}.$$

Эффективность отстаивания:

$$\eta = \frac{\bar{x}_{\text{н}} - \bar{x}_{\text{к}}}{\bar{x}_{\text{н}}} 100\%, \quad \eta = \frac{0,2 - 0,03}{0,2} 100\% = 85\%.$$

Ответ: $\tau_{\text{ос}} = 2,95 \text{ с}$, $\eta = 85\%$.

Ситуация. В пылеосадительной камере осуществляется свободное осаждение частиц (примесей) стекла при подаче в неё загрязнённого воздуха из стеклодутового цеха. Частицы стекла имеют пластинчатую форму и плотность, равную 2500 кг/м^3 . Средняя масса одной частицы стекла – $2 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$. Температура загрязнённого воздуха в цехе – $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициент динамической вязкости воздуха при нормальных условиях ($0 \text{ }^\circ\text{C}$ и 160 мм рт. ст.) составляет $0,0173 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Константа Сазерленда для воздуха – 124 , плотность воздуха при нормальных условиях – $1,293 \text{ кг/м}^3$.

Определить скорость свободного осаждения частиц примесей (стекла) в осадительной камере при подаче в неё загрязнённого воздуха из стеклодутового цеха.

Дано: $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, $m = 2 \cdot 10^{-5} \text{ кг}$, $t_{\text{с}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $\mu_{\text{с}0} = 0,0173 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $C_{\text{с}} = 124$, $\rho_{\text{с}0} = 1,293 \text{ кг/м}^3$.

Найти: $\omega'_{\text{ос}}$.

Рекомендуемый ход решения. Скорость свободного осаждения частиц стекла в воздухе определяется из формулы (2.9) [16]

$$\text{Re} = \frac{\omega_{\text{ос}} d C_{\text{с}}}{\mu_{\text{с}}},$$

откуда

$$\omega_{oc} = \frac{Re \mu_c}{d_3 C_c}.$$

Критерий Рейнольдса определяется аналогично формуле (2.11) [16], но с учетом свободного осаждения

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}.$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16])

$$Ar = \frac{d_3^3 \cdot (\rho - C_c) C_c g}{\mu_c^2}.$$

Эквивалентный диаметр пластинчатых частиц стекла (формула (2.22) [16]):

$$d_3 = 1,24 \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}}, \quad d_3 = 1,24 \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 10^{-5}}{2500}} = 2,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Плотность дисперсионной среды (воздуха) при рабочих условиях

$$C_c = \rho_{c0} \frac{273}{273+t}, \quad C_c = 1,293 \frac{273}{273+35} = 1,146 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Вязкость дисперсионной среды (воздуха) при рабочих условиях

$$\mu_c = \mu_{c0} \frac{273 + C_c}{273 + C_c + t} \left(\frac{273 + t}{273} \right)^{3/2};$$

$$\mu_c = 0,017 \frac{273 + 124}{273 + 124 + 35} \left(\frac{273 + 35}{273} \right)^{3/2} = 0,01872 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Тогда

$$Ar = \frac{(2,48 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (2500 - 1,146) \cdot 1,146 \cdot 9,81}{(0,01905 \cdot 10^{-3})^2} = 1\,222\,570;$$

$$Re = \frac{1\,222\,570}{18 + 0,575\sqrt{1\,222\,570}} = 1869;$$

$$\omega_{oc} = \frac{1869 \cdot 0,01875 \cdot 10^{-3}}{2,48 \cdot 10^{-3} \cdot 1,146} = 12,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Так как частицы стекла имеют нешарообразную форму, то значение ω_{oc} следует умножить на поправочный коэффициент формы φ . Его значение определяется опытным путём. Примерные значения коэффициентов формы для некоторых частиц даны в табл. 1.

Для частиц стекла пластинчатой формы действительная скорость осаждения будет равна

$$\omega'_{oc} = \omega_{oc} \varphi_{\text{пласт}}, \quad \omega'_{oc} = 12,3 \cdot 0,43 = 5,3 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$$

Ответ: $\omega'_{oc} = 5,3 \frac{\text{М}}{\text{с}}.$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить время отстаивания нешарообразных частиц примесей из сточной воды τ_{oc} и эффективность отстаивания η . Концентрация частиц примесей в сточной воде на входе в отстойник $\bar{x}_H = 0,3$ кг п./кг сл., в осветлённой воде на выходе из отстойника $\bar{x}_K = 0,001$ кг п./кг сл., в осадке (шлам) после слива осветлённой воды $\bar{x}_{\text{шл}} = 0,99$ кг п./кг сл. Частицы примесей имеют угловатую форму $\varphi = 0,66$. Высота слоя осадка после слива составляет $h_{\text{шл}} = 0,15$ м. Скорость отстаивания $\omega_{oc} = 0,1$ м/с. Плотность частиц примесей $\rho = 1700$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{c0} = 999$ кг дс./м³ дс. Температура в аппарате очистки $t = 12$ °С. Площадь сечения аппарата постоянна по его высоте $S = \text{const}$.

2. Определить время отстаивания нешарообразных частиц примесей из сточной воды τ_{oc} и эффективность отстаивания η . Концентрация частиц примесей в сточной воде на входе в отстойник $\bar{x}_H = 0,4$ кг п./кг сл., в осветлённой воде на выходе из отстойника $\bar{x}_K = 0,01$ кг п./кг сл., в осадке (шлам) после слива осветлённой воды $\bar{x}_{\text{шл}} = 0,79$ кг п./кг сл. Частицы примесей имеют продолговатую форму $\varphi = 0,58$. Высота слоя осадка после слива составляет $h_{\text{шл}} = 0,5$ м. Скорость отстаивания $\omega_{oc} = 0,3$ м/с. Плотность частиц примесей $\rho = 2700$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{c0} = 1000$ кг дс./м³ дс. Температура в аппарате очистки $t = 15$ °С. Площадь сечения аппарата постоянна по его высоте $S = \text{const}$.

3. Определить скорость свободного осаждения ω_{oc} нешарообразных частиц примесей в осадительной камере при подаче в неё запылённого воздуха. Концентрация частиц примесей в воздухе на входе в камеру $\bar{x}_H = 0,3$ кг п./кг сл. Частицы примесей имеют пластинчатую форму $\varphi = 0,43$. Масса одной частицы примесей $m = 2,2 \cdot 10^{-4}$ кг. Плот-

ность частиц примесей $\rho = 1800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0173 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 30$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

4. Определить скорость свободного осаждения $\omega_{ст}$ нешарообразных частиц примесей в осадительной камере при подаче в неё запылённого воздуха. Концентрация частиц примесей в воздухе на входе в камеру $\bar{x}_н = 0,25$ кг п./кг сл. Частицы примесей имеют округлую форму $\phi = 0,77$. Масса одной частицы примесей $m = 2,35 \cdot 10^{-3}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2000$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0173 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 25$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

2.2. ГРАВИТАЦИОННОЕ СТЕСНЁННОЕ ОТСТАИВАНИЕ

Теоретические основы гравитационного стеснённого отстаивания

При отстаивании неоднородных (полидисперсных) систем наблюдается постепенное увеличение концентрации частиц примесей в очистном аппарате по направлению сверху вниз. Над слоем осадка образуется зона сгущённой суспензии, в которой происходит *стеснённое осаждение* частиц примесей, сопровождающееся трением между частицами. При этом более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы бóльших 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 по его высоте. Постоянное уплотнение частиц обусловлено уменьшением скорости частиц по мере приближения к днищу очистного аппарата. Замедление движения частиц сверху вниз объясняется тормозящим действием жидкости, вытесняемой осаждающимися частицами и движущейся от неподвижной перегородки (днища) в направлении, обратном движению частиц.

При периодическом процессе отстаивания высота отдельных зон изменяется во времени до момента полного расслоения неоднородной системы на осадок и осветлённую жидкость. Это является следствием изменения скорости отстаивания $\omega_{ст}$ при стеснённом осаждении во времени τ .

В начале отстаивания осаждаются преимущественно более крупные частицы, вызывающие наиболее интенсивное обратное движение жидкости. Однако по мере увеличения концентрации этих частиц тормозящее влияние обратного тока жидкости ослабевает, и скорость отстаивания возрастает до момента установления динамического равновесия между действующей силой (весом) и силой сопротивления среды. В последующий период времени совместное (коллективное) осаждение частиц происходит с постоянной скоростью. Завершающая и наиболее медленная стадия процесса – уплотнение осадка, когда частицы в нём располагаются настолько близко друг к другу, что вытеснение жидкости становится всё более затруднительным, и процесс отстаивания протекает с уменьшающейся скоростью.

Скорость стеснённого осаждения меньше скорости свободного осаждения. Это объясняется тем, что при естественном осаждении частицы примесей испытывают не только большое сопротивление среды, но и добавочное сопротивление, обусловленное трением и соударениями частиц. Увеличение сопротивления среды связано в данном случае с динамическим воздействием на неё всей массы осаждающихся частиц, приводящим к возникновению восходящего потока среды, а также с возрастанием вязкости среды.

Примеры расчёта процесса гравитационного стеснённого отстаивания

Ситуация. На машиностроительном предприятии происходит очистка сточной воды методом отстаивания. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде – 0,1 кг п./кг сл. Минимальный размер удаляемых частиц примесей – 25 мкм. Плотность частиц примесей (песка) – 1500 кг/м³. Плотность дисперсионной среды в суспензии (чистой воды) – 998 кг/м³. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) – 1,005·10⁻³ Па·с.

Определить, во сколько раз скорость стеснённого отстаивания будет меньше скорости свободного отстаивания частиц примесей шарообразной формы из суспензии сточной воды.

Дано: $\bar{x} = 0,1$ кг п./кг сл, $d = 25$ мкм, $\rho = 1500$ кг/м³, $C_c = 998$ кг/м³, $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Найти: $\frac{\omega_{ос}}{\omega_{ст}} = ?$

Рекомендуемый ход решения. Скорость стеснённого осаждения (формула (2.16) [16])

$$\omega_{\text{ст}} = \frac{\text{Re}_{\text{ст}} \mu_{\text{с}}}{d C_{\text{с}}}.$$

Критерий Рейнольдса (формула (2.17) [16])

$$\text{Re}_{\text{ст}} = \frac{\text{Ar}\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{\text{Ar}\varepsilon^{4,75}}}.$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16]):

$$\text{Ar} = \frac{d^3(\rho - \rho_{\text{с}})C_{\text{с}}g}{\mu_{\text{с}}^2}, \quad \text{Ar} = \frac{(25 \cdot 10^{-6}) \cdot (1500 - 998) \cdot 998 \cdot 9,81}{(1,005 \cdot 10^{-3})^2} = 0,076.$$

Объёмная доля жидкости в суспензии (порозность слоя твёрдых частиц примесей)

$$\varepsilon = 1 - \bar{x} \frac{\rho_{\text{сл}}}{\rho}.$$

Плотность суспензии (слоя чистой воды, содержащей частицы примесей):

$$\rho_{\text{сл}} = \frac{1}{\bar{x} + \frac{1 - \bar{x}}{\rho_{\text{с}}}}, \quad \rho_{\text{сл}} = \frac{1}{\frac{0,1}{1500} + \frac{1 - 0,1}{998}} = 1032 \text{ кг сл./м}^3 \text{ сл.}$$

Тогда

$$\varepsilon = 1 - 0,1 \frac{1032}{1500} = 0,931 \text{ м}^3 \text{ д.с./м}^3 \text{ сл.};$$

$$\text{Re}_{\text{ст}} = \frac{0,029 \cdot 0,931^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{0,076 \cdot 0,931^{4,75}}} = 0,0029;$$

$$\omega_{\text{ст}} = \frac{0,0029 \cdot 1,005 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-6} \cdot 998} = 1,168 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Скорость свободного отстаивания, учитывая, что $\varepsilon = 0,931 > 0,1$, определяется из формулы (2.12) [16]

$$\omega_{\text{ст}} = \omega_{\text{ос}} \varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)},$$

откуда

$$\omega_{\text{ос}} = \frac{\omega_{\text{ст}}}{\varepsilon^2 \cdot 10^{-1,82(1-\varepsilon)}}, \quad \omega_{\text{ос}} = \frac{1,168 \cdot 10^{-4}}{0,931^2 \cdot 10^{-1,82(1-0,931)}} = 1,799 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Отношение скорости свободного отстаивания к скорости стеснённого отстаивания

$$\frac{\omega_{\text{ос}}}{\omega_{\text{ст}}} = \frac{1,799 \cdot 10^{-4}}{1,168 \cdot 10^{-4}} = 1,54 .$$

Следовательно, скорость стеснённого отстаивания частиц примесей из сточной воды меньше скорости их свободного отстаивания в 1,54 раза.

Ответ: $\frac{\omega_{\text{ос}}}{\omega_{\text{ст}}} = 1,54 .$

Ситуация. В отстойнике строительного предприятия реализуется процесс стеснённого совместного осаждения частиц асбеста и гипса. Сточная вода представляет собой полидисперсную систему, в которой частицы по размерам составляют две фракции: в первой (мелкой) фракции частицы примесей имеют диаметры от $1 \cdot 10^{-3}$ м до $2 \cdot 10^{-3}$ м, во второй (крупной) фракции – от $10 \cdot 10^{-3}$ м до $15 \cdot 10^{-3}$ м. Концентрация частиц асбеста мелкой фракции – 0,05 кг п. /кг сл., частиц асбеста крупной фракции – 0,02 кг п. /кг сл., частиц гипса мелкой фракции – 0,08 кг п. /кг сл., частиц гипса крупной фракции – 0,04 кг п. /кг сл. Плотность частиц асбеста – 2600 кг/м³, гипса – 2240 кг/м³. Критерий Рейнольдса для стеснённого осаждения принять равным $\sqrt{3Ag}$. Коэффициент динамической вязкости чистой воды – $1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность чистой воды – 998 кг дс/м³ дс.

Определить скорость стеснённого осаждения частиц примесей (асбеста и гипса) из сточной воды.

Дано: $d_M^{\text{min}} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, $d_M^{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $d_k^{\text{min}} = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $d_k^{\text{max}} = 15 \cdot 10^{-3}$ м, $\bar{x}_M^a = 0,05$ кг п. /кг сл., $\bar{x}_k^a = 0,02$ кг п. /кг сл., $\bar{x}_M^r = 0,08$ кг п. /кг сл., $\bar{x}_k^r = 0,04$ кг п. /кг сл., $\rho^a = 2600$ кг/м³, $\rho^r = 2240$ кг/м³, $Re_{\text{ст}} = \sqrt{3Ag}$, $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho_c = 998$ кг дс/м³ дс.

Найти: $\omega_{\text{ст}}$.

Рекомендуемый ход решения. Скорость стеснённого осаждения (формула (2.16) [16])

$$\omega_{\text{ст}} = \frac{Re_{\text{ст}} \mu_c}{dC_c} .$$

Средний диаметр частиц примесей мелкой фракции:

$$d_{\text{мср}} = \frac{d_{\text{м}}^{\text{min}} + d_{\text{м}}^{\text{max}}}{2}, \quad d_{\text{мср}} = \frac{1 \cdot 10^{-3} + 7 \cdot 10^{-3}}{2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средний диаметр частиц примесей крупной фракции:

$$d_{\text{кср}} = \frac{d_{\text{к}}^{\text{min}} + d_{\text{к}}^{\text{max}}}{2}, \quad d_{\text{кср}} = \frac{10 \cdot 10^{-3} + 15 \cdot 10^{-3}}{2} = 12,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Средний диаметр частиц примесей крупной фракции:

$$d = \frac{d_{\text{мср}} \bar{x}_{\text{м}}^{\text{а}} + d_{\text{мср}} \bar{x}_{\text{к}}^{\text{а}} + d_{\text{ксп}} \bar{x}_{\text{м}}^{\text{г}} + d_{\text{ксп}} \bar{x}_{\text{к}}^{\text{г}}}{\bar{x}_{\text{м}}^{\text{а}} + \bar{x}_{\text{к}}^{\text{а}} + \bar{x}_{\text{м}}^{\text{г}} + \bar{x}_{\text{к}}^{\text{г}}},$$

$$d = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 + 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08 + 12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,04}{0,05 + 0,02 + 0,08 + 0,04} = 9,36 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16])

$$\text{Ar} = \frac{d^3 \cdot (\rho - C_c) C_c g}{\mu_c^2}.$$

Средняя плотность частиц примесей:

$$\rho = \frac{\rho^{\text{а}} \bar{x}_{\text{м}}^{\text{а}} + \rho^{\text{а}} \bar{x}_{\text{к}}^{\text{а}} + \rho^{\text{г}} \bar{x}_{\text{м}}^{\text{г}} + \rho^{\text{г}} \bar{x}_{\text{к}}^{\text{г}}}{\bar{x}_{\text{м}}^{\text{а}} + \bar{x}_{\text{к}}^{\text{а}} + \bar{x}_{\text{м}}^{\text{г}} + \bar{x}_{\text{к}}^{\text{г}}},$$

$$\rho = \frac{2600 \cdot 0,05 + 2600 \cdot 0,02 + 2240 \cdot 0,08 + 2240 \cdot 0,04}{0,05 + 0,02 + 0,08 + 0,04} = 2372 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда

$$\text{Ar} = \frac{(9,36 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (2372 - 998) \cdot 998 \cdot 9,81}{(1,005 \cdot 10^{-3})^2} = 10\,921\,485;$$

$$\text{Re}_{\text{ст}} = \sqrt{3 \cdot 10\,921\,485} = 5724;$$

$$\omega_{\text{ст}} = \frac{5724 \cdot 1,005 \cdot 10^{-3}}{9,36 \cdot 10^{-3} \cdot 998} = 0,61 \text{ м/с.}$$

Ответ: $\omega_{\text{ст}} = 0,61 \text{ м/с.}$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить, во сколько раз скорость стеснённого отстаивания $\omega_{\text{ст}}$ будет меньше скорости свободного отстаивания $\omega_{\text{ос}}$ твёрдых частиц примесей нешарообразной формы из суспензии сточной воды. Частицы примесей имеют пластинчатую форму $\varphi = 0,43$. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде $x' = 0,3$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 2 \cdot 10^{-3}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2000$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $c_{\text{с0}} = 1000$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,007 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 40$ °С.

2. Определить, во сколько раз скорость стеснённого отстаивания $\omega_{\text{ст}}$ будет меньше скорости свободного отстаивания $\omega_{\text{ос}}$ твёрдых частиц примесей нешарообразной формы из суспензии сточной воды. Частицы примесей имеют округлую форму $\varphi = 0,77$. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде $x_m = 0,5$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 2,3 \cdot 10^{-4}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 1200$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{\text{с0}} = 998$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,009 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 10$ °С.

3. В отстойнике машиностроительного предприятия реализуется процесс стеснённого совместного осаждения частиц стали и формовочного песка. Сточная вода представляет собой полидисперсную систему, в которой частицы по размерам составляют две фракции: в первой (мелкой) фракции частицы примесей имеют диаметры от $d_{\text{м}}^{\text{min}} = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м до $d_{\text{м}}^{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-3}$ м, во второй (крупной) фракции – от $d_{\text{к}}^{\text{min}} = 10 \cdot 10^{-3}$ м до $d_{\text{к}}^{\text{max}} = 15 \cdot 10^{-3}$ м. Концентрация частиц стали мелкой фракции $\bar{x}_{\text{м}}^{\text{а}} = 0,07$ кг п. /кг сл., частиц стали крупной фракции $\bar{x}_{\text{к}}^{\text{а}} = 0,03$ кг п. /кг сл., частиц формовочного песка мелкой фракции $\bar{x}_{\text{м}}^{\text{г}} = 0,09$ кг п. /кг сл., частиц формовочного песка крупной фракции $\bar{x}_{\text{к}}^{\text{г}} = 0,02$ кг п. /кг сл. Плотность частиц стали $\rho^{\text{а}} = 7600$ кг/м³, формовочного песка – $\rho^{\text{г}} = 2500$ кг/м³. Критерий Рейнольдса для стеснённого осаждения принять равным $\text{Re}_{\text{ст}} = \sqrt{3\text{Ag}}$. Коэффициент динамической вязкости чистой воды $\mu_{\text{с}} = 1,008 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность чистой воды $\rho_{\text{с}} = 1000$ кг дс./м³ дс. Определить скорость стеснённого осаждения частиц примесей (частиц стали и формовочного песка) из сточной воды $\omega_{\text{ст}}$.

4. В отстойнике оконного комбината реализуется процесс стеснённого совместного осаждения частиц стали и стекла. Сточная вода представляет собой полидисперсную систему, в которой частицы по размерам составляют две фракции: в первой (мелкой) фракции частицы примесей имеют диаметры от $d_M^{\min} = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м до $d_M^{\max} = 14 \cdot 10^{-3}$ м, во второй (крупной) фракции – от $d_K^{\min} = 20 \cdot 10^{-3}$ м до $d_K^{\max} = 25 \cdot 10^{-3}$ м. Концентрация частиц стали мелкой фракции $\bar{x}_M^a = 0,015$ кг п. /кг сл., частиц стали крупной фракции $\bar{x}_K^a = 0,023$ кг п. /кг сл., частиц стекла мелкой фракции $\bar{x}_M^r = 0,03$ кг п. /кг сл., частиц формовочного песка крупной фракции $\bar{x}_K^r = 0,05$ кг п. /кг сл. Плотность частиц стали $\rho^a = 7600$ кг/м³, стекла – $\rho^r = 2600$ кг/м³. Критерий Рейнольдса для стеснённого осаждения принять равным $Re_{ст} = \sqrt{3Ag}$. Коэффициент динамической вязкости чистой воды $\mu_c = 1,003 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность чистой воды $\rho_c = 997$ кг дс/м³ дс. Определить скорость стеснённого осаждения частиц примесей (частиц стали и стекла) из сточной воды $\omega_{ст}$.

2.3. ИНЕРЦИОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Теоретические основы инерционного осаждения

Инерционное осаждение основано на использовании сил инерции, возникающих при резком изменении направления газового (жидкостного) потока, которое сопровождается значительным уменьшением его скорости. Устанавливая на пути движения загрязнённого потока отражательные перегородки, стенки цилиндрического корпуса или применяя коленчатые трубопроводы, изменяют направление движения жидкости или газа на 90°, 180°, либо по окружности (спирали). При этом частицы примесей, стремясь сохранить направление своего первоначального движения, удаляются из потока.

Ещё одним способом организации процесса инерционного осаждения является направление потока неоднородной системы во вращающийся аппарат, где частицы примесей, вращаясь вместе с аппаратом, оседают на его стенках (центробежное осадительное центрифугирование) [7, с. 46].

Механизм и кинетика процесса инерционного осаждения аналогичны процессу отстаивания с учётом вместо силы тяжести сил инерции или центробежных сил.

Во вращающемся потоке на взвешенную частицу действует инерционная (центробежная) сила, направляющая данную частицу к пери-

ферии от центра по радиусу со скоростью, равной скорости осаждения ω_{oc} .

Окружная скорость несущего частицу потока жидкости или газа $\omega_{окр}$ направлена по касательной траектории потока АА. В результате различия в направленности скоростей ω_{oc} и $\omega_{окр}$ и воздействия соответствующих сил частица примеси отделяется от потока жидкости или газа, сходит с его траектории с результирующей скоростью ω_p .

Сопrotивление инерционному (центробежному) осаждению, как и в случае отстаивания, оказывает сила трения (сила сопротивления среды).

Пример расчёта процесса инерционного осаждения

Ситуация. На очистных сооружениях сталелитейного завода происходит инерционное осаждение частиц колчедана в сточной воде. Диаметр частиц – 3 мм. Коэффициент гидравлического сопротивления при движении потока сточной воды в отстойнике инерционного осаждения равен 250. Перепад давлений в отстойнике – 720 000 Па. Радиус поворота сточной воды – 2 м. Вязкость дисперсионной среды – $1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Плотность частиц колчедана – 5000 кг/м^3 . Осаждение частиц колчедана свободное.

Определить результирующую скорость инерционного осаждения частиц колчедана в сточной воде со сталелитейного завода.

Дано: $d_3 = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $\xi_c = 250$, $\Delta P_c = 720\,000$ Па, $r = 2$ м,
 $\rho_c = 998 \text{ кг/м}^3$, $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho = 5000 \text{ кг/м}^3$, $\frac{\omega_c}{\omega_{bc}} = 1$.

Найти: ω_p .

Рекомендуемый ход решения. Результирующая скорость инерционного осаждения частиц колчедана в сточной воде

$$\omega_p = \sqrt{\omega_{окр}^2 + \omega_{oc}^2}.$$

Окружная скорость потока сточной воды (формула (2.27) [16]):

$$\omega_{окр} = \sqrt{\frac{2\Delta P_c}{\xi_c \rho_c}}, \quad \omega_{окр} = \sqrt{\frac{2 \cdot 720\,000}{250 \cdot 998}} = 2,402 \text{ м/с}.$$

Скорость центробежного (инерционного) осаждения частиц колчедана в сточной воде (формула (2.25) [16])

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{4d\omega^2 r(\rho - \rho_c)}{3\xi_c \rho_c}}.$$

Угловая скорость потока сточной воды определяется из формулы (2.28) [16]

$$\omega_{\text{окр}} = \omega r ,$$

откуда

$$\omega = \frac{\omega_{\text{окр}}}{r} = \frac{2,4}{2} = 1,201 \text{ с}^{-1}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления движения частицы колчедана зависит от значения критерия Рейнольдса (формула (2.17) [16])

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,575\sqrt{\text{Ar}}} .$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16]):

$$\text{Ar} = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2} ;$$

$$\text{Ar} = \frac{(3 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (5000 - 998) \cdot 998 \cdot 9,81}{(1,005 \cdot 10^{-3})^2} = 1\,047\,389 ;$$

$$\text{Re} = \frac{1\,047\,389}{18 + 0,575\sqrt{1\,047\,389}} = 1727 > 500.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления при движении частиц колчедана в сточной воде для $\text{Re} > 500$ (формула (2.8) [16])

$$\xi = 0,44 .$$

Тогда

$$\omega_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 1,201^2 \cdot 2 \cdot (5000 - 998)}{3 \cdot 0,44 \cdot 998}} = 0,324 \text{ м/с};$$

$$\omega_p = \sqrt{2,402^2 + 0,324^2} = 2,423 \text{ м/с}.$$

Ответ: $\omega_p = 2,423 \text{ м/с}$.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить результирующую скорость инерционного стеснённого осаждения ω_p нешарообразных твёрдых частиц примесей в сточ-

ной воде. Коэффициент гидравлического сопротивления при движении потока сточной воды в отстойнике инерционного осаждения $\alpha_c = 260$. Перепад давлений в отстойнике $\Delta P_c = 730\ 000$ Па. Радиус поворота сточной воды $r = 4$ м. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде на входе в отстойник инерционного осаждения $\bar{x} = 0,3$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 2,4 \cdot 10^{-5}$ кг. Частицы примесей имеют угловатую форму $\phi = 0,66$. Плотность частиц примесей $\rho = 1800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{c0} = 1000$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,007 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 30$ °С.

2. Определить результирующую скорость инерционного стеснённого осаждения ω_p нешарообразных твёрдых частиц примесей в сточной воде. Коэффициент гидравлического сопротивления при движении потока сточной воды в отстойнике инерционного осаждения $\xi_c = 270$. Перепад давлений в отстойнике $\Delta P_c = 820\ 000$ Па. Радиус поворота сточной воды $r = 3,5$ м. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде на входе в отстойник инерционного осаждения $\bar{x} = 0,7$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 2,7 \cdot 10^{-5}$ кг. Частицы примесей имеют продолговатую форму $\phi = 0,58$. Плотность частиц примесей $\rho = 1900$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{c0} = 998$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 25$ °С.

3. Определить результирующую скорость инерционного стеснённого осаждения ω_p нешарообразных твёрдых частиц примесей в сточной воде. Коэффициент гидравлического сопротивления при движении потока сточной воды в отстойнике инерционного осаждения $\xi_c = 300$. Перепад давлений в отстойнике $\Delta P_c = 700\ 000$ Па. Радиус поворота сточной воды $r = 3$ м. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде на входе в отстойник инерционного осаждения $\bar{x} = 0,5$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 2,5 \cdot 10^{-5}$ кг. Частицы примесей имеют округлую форму $\phi = 0,77$. Плотность частиц примесей $\rho = 2100$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{c0} = 1000$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 20$ °С.

4. Определить результирующую скорость инерционного стеснённого осаждения ω_p нешарообразных твёрдых частиц примесей в сточной воде. Коэффициент гидравлического сопротивления при движении потока сточной воды в отстойнике инерционного осаждения $\xi_c = 200$.

Перепад давлений в отстойнике $\Delta P_c = 800\,000$ Па. Радиус поворота сточной воды $r = 5$ м. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в сточной воде на входе в отстойник инерционного осаждения $\bar{x} = 0,3$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 2 \cdot 10^{-5}$ кг. Частицы примесей имеют шарообразную форму $\varphi = 1$. Плотность частиц примесей $\rho = 2800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{c0} = 997$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,007 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 23$ °С.

2.3. ВСПЛЫВАНИЕ

Теоретические основы всплывания

Процесс всплывания основан на различии плотностей дисперсной среды и частиц дисперсной фазы. Частицы дисперсной фазы (примеси) имеют меньшую плотность, чем дисперсная среда (жидкость или газ), благодаря чему выталкивающая сила, действующая на частицу дисперсной фазы, становится больше силы тяжести, и частица движется сверху вниз.

Механизм и кинетика процесса всплывания аналогичны процессу гравитационного отстаивания с учётом вместо силы тяжести сил выталкивания.

Скорость всплывания частиц определяется аналогично процессу отстаивания для всех режимов всплывания.

Движение частиц примесей (лёгкой, дисперсной фазы) вверх вызывает в сточной воде или газе вторичные потоки, тормозящие подъём.

При вводе, например, сточной воды в аппарат очистки может произойти измельчение капелек лёгкой жидкости (жидких примесей), особенно при ударе струи о поверхность, что сопровождается изменением давления.

Примеры расчётов процесса всплывания

Ситуация. На предприятии по производству косметики и парфюмерии на локальных очистных сооружениях реализуется процесс очистки сточной воды от нонанола. Длина спиртловушки – 3 м. Начальная концентрация нонанола в сточной воде – 0,9 кг п./кг сл., конечная концентрация нонанола в осветлённой воде – 0,01 кг п./кг сл., плотность нонанола в условиях реализации процесса – 792 кг/м³, вязкость нонанола в условиях реализации процесса – $0,584 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Скорость прохождения сточной воды через спиртловушку – 0,005 м/с. Плотность чистой воды – 998 кг/м³, вязкость чистой воды – $1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Эквивалентный диаметр капель нонанола в условиях реализации процесса – $80 \cdot 10^{-6}$ м. Всплывание частиц нонанола свободное.

Определить высоту всплывания в спиртловушке капель нонанола из сточной воды с производства.

Дано: $\bar{x}_n = 0,9$ кг п. /кг сл., $\bar{x}_k = 0,01$ кг п. /кг сл., $\rho = 792$ кг/м³, $\mu = 0,584 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\omega_c = 0,005$ м/с, $\rho_c = 998$ кг/м³, $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $d_3 = 80 \cdot 10^{-6}$ м, $\frac{\omega_c}{\omega_{bc}} = 1$.

Найти: h_{bc} .

Рекомендуемый ход решения. Высота всплывания капель нонанола в спиртловушке

$$h_{bc} = \frac{\omega'_{bc} L}{\omega_c \eta}.$$

Скорость всплывания капель нонанола с учетом торможения вторичными потоками в спиртловушке (формула (2.32) [16])

$$\omega''_c = \omega_{bc} \frac{3\mu + 2\mu_c}{3\mu + 3\mu_c}.$$

Скорость всплывания капель нонанола (формула (2.31) [16])

$$\omega_{bc} = \sqrt{\frac{4dg(\rho_c - \rho)}{3\xi\rho_c}}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления зависит от значения критерия Рейнольдса (аналогично формуле (2.17) [16])

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}}.$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16]):

$$Ar = \frac{d_3^3(\rho_c - \rho)\rho_c g}{\mu_c^2}, \quad Ar = \frac{(80 \cdot 10^{-6})^3 \cdot (998 - 792) \cdot 998 \cdot 9,81}{(1,005 \cdot 10^{-3})^2} = 1,022.$$

Тогда

$$Re = \frac{1,022}{18 + 0,575\sqrt{1,022}} = 0,055 < 2.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления при $Re < 2$ (формула (2.6) [16])

$$\xi = \frac{24}{Re} = \frac{24}{0,055} = 436,36.$$

Тогда

$$\omega_{\text{вс}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 80 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81(998 - 792)}{3 \cdot 436,36 \cdot 998}} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м/с};$$

$$\omega_c'' = 0,7 \cdot 10^{-3} \frac{3 \cdot 0,584 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 1,005 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 0,584 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 1,005 \cdot 10^{-3}} = 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}.$$

Эффективность улавливания нонанола:

$$\eta = \frac{\bar{x}_n - \bar{x}_k}{\bar{x}_n}, \quad \eta = \frac{0,9 - 0,01}{0,9} = 0,988.$$

Тогда

$$h_{\text{вс}} = \frac{0,55 \cdot 10^{-3} \cdot 3}{0,005 \cdot 0,988} = 0,33 \text{ м}.$$

Ответ: $h_{\text{вс}} = 0,33 \text{ м}$.

Ситуация. В 50 км от берега затонул нефтяной танкер. При крушении произошла утечка нефти. Глубина затопления танкера 175 м. Скорость движения нефти к берегу составляет 0,1 м/с. Плотность нефти – 820 кг/м³, эквивалентный диаметр частиц нефти – 90 мкм. Плотность морской воды принять равной 1000 кг/м³, вязкость морской воды – 1,79·10⁻³ Па·с. Скорость подводных течений – 0 м/с. Режим всплывания – ламинарный (Re < 2). Всплывание частиц свободное.

Определить максимальное время, через которое необходимо начать очистку моря от нефти (прежде чем нефть достигнет берега).

Дано: $L_c = 50 \text{ км}$, $h_{\text{вс}} = 175 \text{ м}$, $\omega_c = 0,1 \text{ м/с}$, $\rho = 820 \text{ кг/м}^3$, $d_3 = 90 \text{ мкм}$, $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\mu_c = 1,79 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $v_{\text{п}} = 0 \text{ м/с}$, $\text{Re} < 2$, $\varepsilon = 1$.

Найти: τ_{max} .

Рекомендуемый ход решения. Максимальное время, через которое нефть достигнет берега

$$\tau_{\text{max}} = \tau_{\text{вс}} + \tau_{\text{т}}.$$

Время всплывания частиц нефти на поверхности моря

$$\tau_{\text{вс}} = h_{\text{вс}}/\omega_{\text{вс}}.$$

Скорость всплывания частиц нефти со дна моря при ламинарном режиме (аналогично формуле (2.10) [16]):

$$\omega_{\text{вс}} = d_3^2 g(\rho_c - \rho)/18\mu_c,$$

$$\omega_{\text{вс}} = [(90 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 9,81 \cdot (1000 - 780)] / 18 \cdot 1,79 \cdot 10^{-3} = 0,54 \cdot 10^{-3} \text{ м/с} = \\ = 0,54 \text{ мм/с.}$$

Тогда

$$\tau_{\text{вс}} = 175 / (0,54 \cdot 10^{-3}) = 324 \ 074 \text{ с} = 90 \text{ ч.}$$

Время движения всплывших частиц нефти к берегу:

$$\tau_{\text{т}} = L_c / \omega_{\text{с}}, \quad \tau_{\text{т}} = 50 \ 000 / 0,1 = 500 \ 000 \text{ с} \approx 139 \text{ ч} \approx 5,7 \text{ дней.}$$

Тогда

$$\tau = 324 \ 074 + 500 \ 000 = 824 \ 074 \approx 229 \text{ ч} \approx 9,5 \text{ дней.}$$

Ответ: $\tau_{\text{max}} = 229 \text{ ч.}$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить высоту свободного всплывания $h_{\text{вс}}$ в спиртоловушке капель жидких примесей из сточной воды. Длина спиртоловушки $L = 3 \text{ м}$. Скорость прохождения сточной воды через спиртоловушку $\omega_{\text{с}} = 0,001 \text{ м/с}$. Концентрация частиц примесей в сточной воде на входе в спиртоловушку $\bar{x}_{\text{н}} = 0,9 \text{ кг п./кг сл.}$, в осветлённой воде на выходе из спиртоловушки $\bar{x}_{\text{к}} = 0,02 \text{ кг п./кг сл.}$ Частицы примесей имеют шарообразную форму $\phi = 1,0$. Масса одной частицы примесей $m = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$. Плотность частиц примесей $\rho = 790 \text{ кг п./м}^3 \text{ п.}$ Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{\text{с0}} = 1000 \text{ кг дс./м}^3 \text{ дс.}$ Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,007 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Температура в аппарате очистки $t = 35 \text{ }^\circ\text{C}$. Вязкость частиц примесей $\mu = 0,504 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

2. Определить высоту свободного всплывания $h_{\text{вс}}$ в спиртоловушке капель жидких примесей из сточной воды. Длина спиртоловушки $L = 6 \text{ м}$. Скорость прохождения сточной воды через спиртоловушку $\omega_{\text{с}} = 0,0008 \text{ м/с}$. Концентрация частиц примесей в сточной воде на входе в спиртоловушку $\bar{x}_{\text{н}} = 0,7 \text{ кг п./кг сл.}$, в осветлённой воде на выходе из спиртоловушки $\bar{x}_{\text{к}} = 0,002 \text{ кг п./кг сл.}$ Частицы примесей имеют шарообразную форму $\phi = 1,0$. Масса одной частицы примесей $m = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$. Плотность частиц примесей $\rho = 700 \text{ кг п./м}^3 \text{ п.}$ Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в суспензии $\rho_{\text{с0}} = 998 \text{ кг дс./м}^3 \text{ дс.}$ Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,003 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Температура в аппарате очистки $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Вязкость частиц примесей $\mu = 0,490 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

3. На расстоянии $L_{\text{с}} = 70 \ 000 \text{ м}$ от берега затонул нефтяной танкер. При крушении произошла утечка нефти. Глубина затопления танкера $h_{\text{вс}} = 200 \text{ м}$. Определить максимальное время τ_{max} , через которое необходимо начать очистку моря от нефти (прежде чем нефть достигнет бе-

рега), если скорость движения нефти к берегу составляет $\omega_c = 0,3$ м/с. Всплытие частиц нефти – свободное. Скорость подводных течений принять равной $x_{п} = 0$ м/с. Концентрация частиц нефти на месте затопления танкера $\bar{x}_н = 0,999$ кг п./кг сл. Частицы нефти имеют шарообразную форму $\phi = 1,0$. Масса одной частицы нефти $m = 1,2 \cdot 10^{-7}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 780$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (морской воды) $\rho_{с0} = 1300$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (морской воды) $\mu_c = 1,89 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура морской воды $t = 0$ °С.

4. На расстоянии $L_c = 10\ 000$ м от берега затонул нефтяной танкер. При крушении произошла утечка нефти. Глубина затопления танкера $h_{вс} = 130$ м. Определить максимальное время τ_{max} , через которое необходимо начать очистку моря от нефти (прежде чем нефть достигнет берега), если скорость движения нефти к берегу составляет $\omega_c = 0,7$ м/с. Всплытие частиц нефти – свободное. Скорость подводных течений принять равной $x_{п} = 0$ м/с. Концентрация частиц нефти на месте затопления танкера $\bar{x}_н = 0,999$ кг п./кг сл. Частицы нефти имеют шарообразную форму $\phi = 1,0$. Масса одной частицы нефти $m = 1,05 \cdot 10^{-7}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 770$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (морской воды) $\rho_{с0} = 1200$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (морской воды) $\mu_c = 1,7 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура морской воды $t = -1$ °С.

2.4. ПСЕВДООЖИЖЕНИЕ

Теоретические основы псевдооживления

Псевдооживление – процесс пропускания загрязнённого потока жидкости или газа через слой ранее выпавшего осадка (твёрдых частиц примесей) со скоростью, обеспечивающей поддержание осадка во взвешенном состоянии.

В данном процессе не частица дисперсной фазы движется относительно неподвижного потока дисперсной среды (как в процессе осаждения), а сам поток движется относительно условной неподвижной частицы.

В данном случае выполняются все законы, принципы и условия осаждения (отстаивания), рассмотренные ранее.

Однако процесс псевдооживления имеет свои особенности.

Так, при относительно небольших скоростях зернистый слой твёрдых частиц примесей остаётся неподвижным, и его характеристики (удельная поверхность, порозность и др.) не меняются с изменением скорости потока. Дисперсная среда (жидкость или газ) при этом просто фильтруется через слой.

Когда скорость потока достигает некоторой критической величины, слой частиц перестаёт быть неподвижным, его порозность (объём и количество пустот) и высота начинают увеличиваться. Слой приобретает текучесть и переходит как бы в кипящее (псевдооживленное) состояние. В таком слое частицы интенсивно перемешиваются и перемещаются в потоке в различных направлениях, и весь слой напоминает кипящую жидкость, ограниченную ясно выраженной верхней границей раздела с потоком дисперсионной среды, прошедшим слой.

При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота продолжают возрастать вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения, при котором слой разрушается, и частицы начинают уноситься потоком дисперсионной среды.

Первая критическая скорость, при которой нарушается неподвижность слоя, и он начинает переходить в псевдооживленное состояние, называют *скоростью псевдооживления* $\omega_{\text{пс}}$. При увеличении скорости потока до значения, равного $\omega_{\text{пс}}$, сопротивление зернистого слоя Δp возрастает, а высота h не изменяется.

Начало псевдооживления наступает при равенстве силы гидравлического сопротивления R слоя весу всех его частиц G . Перепад давлений в слое, соответствующий точке B , несколько больше, чем это необходимо для поддержания слоя во взвешенном состоянии. Это объясняется действием сил сцепления между частицами слоя, находящегося в покое. Когда скорость потока достигает значения $\omega_{\text{пс}}$, частицы преодолевают силы сцепления, перепад давлений становится равным весу частиц и остаётся постоянным.

Вторая критическая скорость, при которой слой разрушается и начинается массовый унос частиц дисперсионной фазы потоком дисперсионной среды, называется *скоростью уноса*, или *скоростью свободного витания* частиц $\omega_{\text{св}}$.

При скорости потока, равной $\omega_{\text{св}}$, порозность слоя настолько велика ($\varepsilon \approx 1$), что движение отдельных частиц не зависит от остальных частиц, и частицы как бы витают в среде. При малейшем превышении скорости потока величины $\omega_{\text{св}}$ частицы уносятся вверх.

Таким образом, условие витания частицы в восходящем потоке идентично условию равномерного осаждения частицы в неподвижной среде (раздел 2.1). Поэтому скорость уноса (свободного витания) $\omega_{\text{св}}$ можно определять так же, как скорость осаждения $\omega_{\text{ос}}$.

Примеры расчёта процесса псевдооживления

Ситуация. Загрязнённый воздух очищается от взвешенных частиц винилпласта при критерии Рейнольдса, средним между началом

псевдооживления и уносом частиц. Частицы винилпласта имеют плотность 1380 кг/м^3 и диаметр $1,5 \text{ мм}$. Плотность воздуха – $1,293 \text{ кг/м}^3$, вязкость воздуха – $0,0173 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Высота неподвижного слоя частиц винилпласта – 10 см , порозность неподвижного слоя винилпласта – $0,38$.

Определить скорость загрязнённого воздуха, необходимую для начала образования псевдооживленного слоя частиц примесей винилпласта и высоту псевдооживленного слоя.

$$\text{Дано: } Re' = \frac{Re_{nc} + Re_{св}}{2}, \quad \rho = 1380 \text{ кг/м}^3, \quad d = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$\rho_c = 1,293 \text{ кг/м}^3, \quad \mu_c = 0,0173 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}, \quad h_n = 10 \cdot 10^{-2} \text{ м}, \quad \varepsilon_n = 0,38.$$

$$\text{Найти: } \omega_{nc}, \quad h'_{nc}.$$

Рекомендуемый ход решения. Скорость загрязнённого воздуха, необходимого для начала псевдооживления (формула (2.35) [16])

$$\omega_{nc} = \frac{\mu_c Re_{nc}}{d \rho_c}.$$

Критерий Рейнольдса в случае начала псевдооживления (формула (2.36) [16])

$$Re_{nc} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}.$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16])

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_c) \rho_c g}{\mu_c^2},$$

$$Ar = \frac{(1,5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot (1380 - 1,293) \cdot 1,293 \cdot 9,81}{(0,0173 \cdot 10^{-3})^2} = 197 \ 206.$$

Тогда

$$Re_{nc} = \frac{197 \ 206}{1400 + 5,22\sqrt{197 \ 206}} = 53;$$

$$\omega_{nc} = \frac{0,0173 \cdot 10^{-3} \cdot 53}{1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,293} = 0,47 \text{ м/с}.$$

Текущая высота псевдооживленного слоя (формула (2.40) [16])

$$h'_{nc} = h_n \frac{1 - \varepsilon_n}{1 - \varepsilon_{nc}}.$$

Текущая порозность псевдооживленного слоя (формула (2.39) [16])

$$\varepsilon'_{\text{пс}} = \left(\frac{18 \text{Re}'_{\text{пс}} + 0,36 \text{Re}_{\text{ж}}^2}{\text{Ar}} \right)^{0,21}.$$

Текущий критерий Рейнольдса

$$\text{Re}'_{\text{пс}} = \frac{\text{Re}_{\text{пс}} + \text{Re}_{\text{св}}}{2}.$$

Критерий Рейнольдса при свободном витании (уносе) частиц винилпласта (формула (2.34) [16]):

$$\text{Re}_{\text{св}} = \frac{\text{Ar}}{18 + 0,575\sqrt{\text{Ar}}}, \quad \text{Re}_{\text{св}} = \frac{197\,206}{18 + 0,575\sqrt{197\,206}} = 721,45.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \text{Re}'_{\text{пс}} &= \frac{53 + 721,45}{2} = 387,225; \\ \varepsilon'_{\text{пс}} &= \left(\frac{18 \cdot 387,225 + 0,36 \cdot 387,225^2}{197\,206} \right)^{0,21} = 0,781; \\ h'_{\text{пс}} &= 10 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1 - 0,38}{1 - 0,781} = 28,31 \cdot 10^{-2} \text{ м}. \end{aligned}$$

Ответ: $\omega_{\text{пс}} = 0,47 \text{ м/с}$, $h'_{\text{пс}} = 28,31 \cdot 10^{-2} \text{ м}$.

Ситуация. В научной лаборатории осуществляется исследование процесса псевдооживления. В лабораторных условиях высота взвешенного слоя составила 30 см при диаметре лабораторного цилиндра для псевдооживления – 0,1 м. Порозность псевдооживленного слоя при этом была равна 0,7. Общая масса частиц примесей, подвергшихся испытанию, – 0,3 кг. Плотность дисперсионной среды в процессе испытания – $1,293 \text{ кг/м}^3$. Плотность воды в отстойнике – 998 кг/м^3 .

Определить плотность материала частиц примесей, находящихся в лабораторных условиях в псевдооживленном состоянии, возможность их дальнейшего отстаивания в воде.

Дано: $h = 30 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, $D = 0,1 \text{ м}$, $\varepsilon = 0,7$, $m = 3 \text{ кг}$, $\rho_c = 1,293 \text{ кг/м}^3$, $\rho'_c = 998 \text{ кг/м}^3$.

Найти: ρ .

Рекомендуемый ход решения. Плотность частиц примесей определим из формулы (2.38) [16]

$$\Delta P = g(\rho - \rho_c)(1 - \varepsilon)h,$$

откуда

$$\rho = [\Delta P/g(1 - \varepsilon)h] + \rho_c.$$

Перепад давлений в псевдооживленном слое частиц примесей

$$\Delta P = G/S.$$

Вес материала в слое:

$$G = mg, \quad G = 3 \cdot 9,81 = 29,43 \text{ Н.}$$

Площадь поперечного сечения лабораторного цилиндра:

$$S = \pi D^2/4, \quad S = 3,14 \cdot (0,1)^2/4 = 0,00785 \text{ м}^2.$$

Тогда

$$\Delta P = 29,43/0,00785 = 3749 \text{ Па};$$

$$P = [3749/9,81 \cdot (1 - 0,7) \cdot 30 \cdot 10^{-2}] + 1,293 = 4247,5 \text{ кг/м}^3.$$

Так как плотность частиц

$$\rho = 4247,5 \text{ кг/м}^3 > \rho'_c = 998 \text{ кг/м}^3,$$

то отстаивание их в воде возможно.

Ответ: $\rho = 4247,5 \text{ кг/м}^3$.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить скорость загрязнённого воздуха $\omega_{\text{пс}}$, необходимую для начала образования псевдооживленного слоя частиц примесей не-шарообразной формы, и текущую высоту псевдооживленного слоя $h'_{\text{пс}}$ при значении критерия Рейнольдса $Re' = (Re_{\text{пс}} + Re_{\text{св}})/2$. Высота неподвижного слоя частиц примесей $h_{\text{н}} = 0,5$ м, порозность неподвижного слоя частиц примесей $e_{\text{н}} = 0,38$. Частицы примесей имеют пластинчатую форму $\phi = 0,43$. Масса одной частицы примесей $m = 3,3 \cdot 10^{-2}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2000$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{\text{с0}} = 1,290$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{\text{с0}} = 0,0170 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 24$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_{\text{с}} = 124$.

2. Определить скорость загрязнённого воздуха $\omega_{\text{пс}}$, необходимую для начала образования псевдооживленного слоя частиц примесей не-

шарообразной формы, и текущую высоту псевдооживленного слоя h'_{nc} при значении критерия Рейнольдса $Re' = (Re_{nc} + Re_{cb})/3$. Высота неподвижного слоя частиц примесей $h_n = 0,3$ м, порозность неподвижного слоя частиц примесей $e_n = 0,4$. Частицы примесей имеют округлую форму $\phi = 0,77$. Масса одной частицы примесей $m = 3,0 \cdot 10^{-2}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 1900$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,300$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0180 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 34$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

3. Определить плотность материала частиц примесей ρ нешарообразной формы, находящихся в псевдооживленном состоянии в лабораторном цилиндре, и скорость их дальнейшего отстаивания $\omega_{ст}$ в вертикальной гравитационной отстойной камере. В лабораторном цилиндре высота взвешенного слоя частиц примесей была равна $h = 0,1$ м при диаметре лабораторного цилиндра $D = 0,25$ м; порозность псевдооживленного слоя при этом была равна $e = 0,7$. Вес слоя частиц примесей в лабораторном цилиндре составлял $G = 29,43$ Н. Масса одной частицы примесей $m = 2 \cdot 10^{-5}$ кг. Частицы примесей имеют угловатую форму $\phi = 0,66$. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в лабораторном цилиндре и в отстойнике одинакова и равна $\rho_{c0} = 1000$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,0053 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура дисперсионной среды в лабораторном цилиндре и в аппарате очистки одинакова и равна $t = 18$ °С.

4. Определить плотность материала частиц примесей ρ нешарообразной формы, находящихся в псевдооживленном состоянии в лабораторном цилиндре, и скорость их дальнейшего отстаивания $\omega_{ст}$ в вертикальной гравитационной отстойной камере. В лабораторном цилиндре высота взвешенного слоя частиц примесей была равна $h = 0,15$ м при диаметре лабораторного цилиндра $D = 0,25$ м; порозность псевдооживленного слоя при этом была равна $e = 0,8$. Вес слоя частиц примесей в лабораторном цилиндре составлял $G = 29$ Н. Масса одной частицы примесей $m = 2,4 \cdot 10^{-5}$ кг. Частицы примесей имеют продолговатую форму $\phi = 0,58$. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) в лабораторном цилиндре и в отстойнике одинакова и равна $\rho_{c0} = 999$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,003 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура дисперсионной среды в лабораторном цилиндре и в аппарате очистки одинакова и равна $t = 10$ °С.

2.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Теоретические основы электрического осаждения

Электрическое осаждение (электроосаждение, электрофильтрация, электрофорез) – процесс движения тела (частицы дисперсной фазы) в жидкости или газе (с положительно или отрицательно заряженной поверхности аппарата) в направлении максимума или минимума напряжённости электрического поля под действием электрической (кулоновой) и пондеромоторной сил.

Процесс электрического осаждения реализуется следующим образом. В электрофильтр поступает запылённый частично ионизированный газ. В процессе ионизации молекул газов электрическим разрядом происходит заряд содержащихся в них частиц (от коронирующего электрода), иначе говоря, ионы абсорбируются на поверхности пылинки. Затем под действием электрического поля заряженные (ионизированные) положительно частицы перемещаются к отрицательному электроду, заряженные отрицательно частицы – к положительному электроду. На последней стадии процесса все частицы осаждаются на соответствующих электродах [4, с. 55].

Заряженные газы и жидкости, поступающие на очистку, всегда оказываются частично ионизированными за счёт различных внешних воздействий (рентгеновских лучей, радиоактивных излучений, космических лучей, нагрева газа или жидкости и др.), поэтому они способны проводить ток, попадая в пространство между электродами. Величина силы тока, необходимая для организации процесса электроосаждения, зависит от числа ионов в исходной дисперсионной среде и от напряжения между электродами. При постепенном увеличении напряжения в движение между электродами вовлекается всё большее число ионов, и величина тока растёт до тех пор, пока в движении не окажутся все ионы, имеющиеся в газе. При этом величина силы тока становится постоянной (ток насыщения), несмотря на дальнейший рост напряжения.

При некотором достаточно большом напряжении (критическом напряжении $U_{кр}$) на электродах, при котором возникает коронирующий разряд, движущиеся ионы и электроны настолько ускоряются, что, сталкиваясь с молекулами дисперсной среды (газа или жидкости), ионизируют их, превращая нейтральные молекулы в положительные или отрицательные ионы и электроны. Образовавшиеся новые ионы и электроны ускоряются электрическим полем и, в свою очередь, ионизируют новые молекулы газа. Этот процесс называется *ударной ионизацией газа*. Внешним (визуальным) признаком ударной ионизации является свечение дисперсионной среды или образование короны у коронирующего электрода.

Коронирующий разряд возникает обычно при высоких напряжениях, достигающих 50 кВ и более.

Аэрозольные частицы, поступающие в зону между коронирующим и осадительным электродами, адсорбируют на своей поверхности ионы, образовавшиеся в процессе ударной ионизации, приобретают электрический заряд и наведённый дипольный момент, и получают тем самым ускорение, направленное в сторону электрода с зарядом противоположного знака [8, с. 96].

Зарядка частиц дисперсной фазы в электрическом поле коронного разряда происходит двумя механизмами: воздействием электрического поля (частицы дисперсной фазы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и диффузией ионов. Первый механизм преобладает при размерах частиц более 0,5 мкм, второй – менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2...0,5 мкм эффективны оба механизма [4, с. 55].

Процесс зарядки частиц зависит от подвижности ионов, траектории движения и времени пребывания частиц в зоне коронирующего разряда. Учитывая, что, например, в воздухе и дымовых газах подвижность отрицательных ионов выше, чем положительных, электрофилт-ры газоочистки обычно делают с коронирующим электродом отрицательной полярности.

Время зарядки частиц составляет доли секунд. Обычно частицы, поступающие в аппарат электроосаждения, уже имеют небольшой заряд, полученный за счёт трения о стенки трубопроводов и оборудования. Этот заряд (трибозаряд) не превышает 5% от заряда, получаемого частицей при коронном разряде.

Движение заряженных частиц дисперсной фазы к осадительному электроду происходит под действием гидродинамических сил и сил взаимодействия между электрическим полем и зарядом частицы.

Под действием гидродинамических сил частица движется по направлению движения основного потока дисперсионной среды со скоростью, близкой к скорости этого потока. Например, для газоочистки скорость движения частиц составляет 0,5...2 м/с [8, с. 96].

В однородном электрическом поле на заряженную частицу действует электрическая (кулоновская) сила, обусловленная наличием на частице заряда.

В неоднородном электрическом поле на заряженную частицу, помимо кулоновской силы, действует пондеромоторная сила, обусловленная неоднородностью электрического поля и различием диэлектрической проницаемости среды и частицы.

Явление движения частиц дисперсной фазы под влиянием электрического поля (кулоновской и пондеромоторной сил) называется *электрофорезом* [10, с. 82].

Важное значение в процессе электроосаждения имеет электрическое сопротивление частиц дисперсной фазы [8, с. 97]. Частицы с малой электрической проводимостью могут вызвать явление обратной короны, которое сопровождается образованием положительно заряженных ионов, частично нейтрализующих отрицательный заряд частиц дисперсной фазы, вследствие чего последние теряют способность перемещаться к осадительным электродам и осаждаются [4, с. 57].

С повышением температуры дисперсионной среды возрастают её вязкость и объём, вызывающие увеличение скорости потока среды, что снижает эффективность очистки электроосаждением [4, с. 57].

Движущиеся силы механически воздействуют на молекулы дисперсной среды, и частицы дисперсной фазы и заставляют их двигаться. Это явление называется *электрическим ветром*. Электрический ветер возникает в местах генерации (зарядки) ионов, т.е. у коронирующих электродов, и вызывает циркуляцию дисперсной среды в межэлектродном пространстве с определённой скоростью (например, для воздуха – до 0,5...1,0 м/с). Электрический ветер оказывает влияние на движение частиц дисперсной фазы к осадительным электродам и на перемешивание ионов и взвешенных частиц дисперсной фазы в межэлектродном пространстве. Однако методика расчёта влияния электрического ветра на движение частиц отсутствует, поэтому в расчётах им пренебрегают либо определяют экспериментальным путём [8, с. 97].

Пример расчёта процесса электрического осаждения

Ситуация. На химическом предприятии в трубчатом электрофилт্রে осуществляется очистка газопылевых выбросов от частиц жёлтого фосфора. Критическое напряжение на электродах – 1000 кВ. Радиус коронирующего электрода – 20 см. Давление окружающей среды – атмосферное. Избыточное давление в газоходе – $12 \cdot 10^4$ Па, температура газов – 100 °С. Расход газа – 0,1 м³/с. Высота осадительного электрода – 1 м. Коронирующий электрод имеет отрицательную полярность. Скорость движения частиц к осадительному электроду – 0,09 м/с.

Определить эффективность очистки электрофилтра трубчатого, предназначенного для улавливания из газа частиц жёлтого фосфора.

Дано: $U_{кр} = 1000$ кВ, $R_1 = 20$ см, $P_{окр} = 10 \cdot 10^4$ Па, $P_r = 12 \cdot 10^4$ Па, $t = 100$ °С, $G_v = 0,1$ м³/с, $h_2 = 1$ м, $\omega_3 = 0,09$ м/с.

Найти: η .

Рекомендуемый ход решения. Эффективность очистки от пыли в электрофильтрах

$$\eta = 1 - e^{-\omega_3 F_{\text{уд.2}}}.$$

Удельная поверхность осадительного электрода

$$F_{\text{уд.2}} = F_2/G_v.$$

Поверхность осадительного электрода

$$F_2 = 2\pi R_2 h_2.$$

Критическое напряжение на электродах (формула (2.41) [16])

$$U_{\text{кр}} = E_{\text{кр}} R_1 \ln(R_2/R_1),$$

откуда радиус осадительного электрода:

$$\ln(R_2/R_1) = U_{\text{кр}}/E_{\text{кр}} R_1;$$

$$R_2/R_1 = e^{U_{\text{кр}}/E_{\text{кр}} R_1};$$

$$R_2 = R_1 e^{U_{\text{кр}}/E_{\text{кр}} R_1}.$$

Критическая напряжённость электрического поля для коронирующего электрода отрицательной полярности (формула (2.43) [16])

$$E_{\text{кр}} = 3,04 \left(\beta + 0,0311 \sqrt{\frac{\beta}{R_1}} \right) 10^6.$$

Поправка на плотность газа в рабочих условиях (формула (2.44) [16]):

$$\beta = \frac{(P_{\text{окр}} \pm P_{\Gamma}) 293}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (273 + t)}, \quad \beta = \frac{(10 \cdot 10^4 + 12 \cdot 10^4) 293}{1,013 \cdot 10^5 (273 + 100)} = 1,7.$$

Тогда

$$E_{\text{кр}} = 3,04 \left(1,7 + 0,0311 \sqrt{\frac{1,7}{20 \cdot 10^{-2}}} \right) 10^6 = 5,4 \cdot 10^6 \text{ В/м};$$

$$R_2 = 20 \cdot 10^{-2} \exp \left(\frac{1000 \cdot 10^3}{5,4 \cdot 10^6 \cdot 20 \cdot 10^{-2}} \right) = 0,504 \text{ м} = 50,4 \text{ см};$$

$$F_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,504 \cdot 1 = 3,16 \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{уд}} = 3,16/0,1 = 31,6 \text{ м}^2 \cdot \text{с/м}^3;$$

$$\eta = 1 - \exp(-0,09 \cdot 31,6) = 0,94 = 94\%.$$

Ответ: $\eta = 94\%$.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить эффективность очистки запылённого газа η от частиц пыли нешарообразной формы в трубчатом электрофилт্রে. Критическое напряжение на электродах $U_{кр} = 1100$ кВ. Радиус коронирующего электрода $R_1 = 0,17$ м. Давление окружающей среды $P_{окр} = 100\,000$ Па. Избыточное давление в аппарате очистки $P_r = 130\,000$ Па. Температура запылённого газа $t = 110$ °С. Расход запылённого газа $G_v = 0,2$ м³/с. Высота осадительного электрода $h_2 = 1,2$ м. Коронирующий электрод имеет положительную полярность. Скорость движения (электроосаждения) частиц примесей к осадительному электроду $\omega_3 = 0,08$ м/с. Частицы примесей имеют пластинчатую форму $\phi = 0,43$.

2. Определить эффективность очистки запылённого газа η от частиц пыли нешарообразной формы в трубчатом электрофилт্রে. Критическое напряжение на электродах $U_{кр} = 1000$ кВ. Радиус коронирующего электрода $R_1 = 0,19$ м. Давление окружающей среды $P_{окр} = 100\,030$ Па. Избыточное давление в аппарате очистки $P_r = 10\,500$ Па. Температура запылённого газа $t = 120$ °С. Расход запылённого газа $G_v = 0,15$ м³/с. Высота осадительного электрода $h_2 = 1,15$ м. Коронирующий электрод имеет положительную полярность. Скорость движения (электроосаждения) частиц примесей к осадительному электроду $\omega_3 = 0,07$ м/с. Частицы примесей имеют округлую форму $\phi = 0,77$.

3. Определить эффективность очистки запылённого газа η от частиц пыли нешарообразной формы в трубчатом электрофилт্রে. Критическое напряжение на электродах $U_{кр} = 1040$ кВ. Радиус коронирующего электрода $R_1 = 22$ см. Давление окружающей среды $P_{окр}$ атмосферное. Избыточное давление в газоходе $P_r = 125\,000$ Па, температура газов $t = 110$ °С. Расход газа $G_v = 0,15$ м³/с. Высота осадительного электрода $h_2 = 1,05$ м. Коронирующий электрод имеет отрицательную полярность. Скорость движения частиц к осадительному электроду $\omega_3 = 0,095$ м/с.

4. Определить эффективность очистки запылённого газа η от частиц пыли нешарообразной формы в трубчатом электрофилт্রে. Критическое напряжение на электродах $U_{кр} = 1000$ кВ. Радиус коронирующего электрода $R_1 = 20,5$ см. Давление окружающей среды $P_{окр}$ атмосферное. Избыточное давление в газоходе $P_r = 120\,050$ Па, температура газов $t = 105$ °С. Расход газа $G_v = 0,12$ м³/с. Высота осадительного электрода $h_2 = 0,98$ м. Коронирующий электрод имеет отрицательную полярность. Скорость движения частиц к осадительному электроду $\omega_3 = 0,089$ м/с.

2.6. МАГНИТНОЕ ОСАЖДЕНИЕ

Теоретические основы магнитного осаждения

Магнитное осаждение (магнитная сепарация) – процесс движения пара – или ферромагнитной частицы дисперсной фазы в дисперсионной среде (жидкости, газе, полидисперсном порошке твёрдого материала, руде) в направлении максимума или минимума напряжённости магнитного поля под действием силы магнитного притяжения.

Сущность процесса магнитного осаждения состоит в следующем. При поступлении загрязнённой дисперсионной среды на магнитную очистку парамагнитные (слабомагнитные) и ферромагнитные (сильномагнитные) частицы примесей под действием силы магнитного притяжения перемещаются к намагниченной поверхности и осаждаются на ней. Поведение магнитных частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде в постоянном магнитном поле определяется значением их магнитной восприимчивости χ , а в переменном магнитном поле, помимо этой величины, поведение частиц также зависит от значения остаточной индукции B_r и коэрцитивной (задерживающей) силы для этих частиц.

Величина магнитной восприимчивости выражает связь между магнитным моментом частицы дисперсной фазы и магнитным полем, действующим на частицу.

При помещении частицы дисперсной фазы в магнитное поле с увеличивающейся напряжённостью происходит процесс её намагничивания (увеличения магнитной индукции). При устранении магнитного поля частица сохраняет часть магнитных свойств в виде остаточной индукции.

Для ликвидации остаточной индукции (достижения её нулевого значения $B_r = 0$ Тл) необходимо создать магнитное поле противоположной напряжённости, величину которой называют *коэрцитивной силой* вещества H_c . Чем меньше величина H_c , тем легче размагничивается материал. Процесс создания магнитного поля противоположной направленности называют *перемагничиванием*.

Действие коэрцитивной силы тем больше, чем большими размерами отличаются между собой магнитные частицы.

При напряжённости переменного магнитного поля, превосходящей величину коэрцитивной силы, происходит напряжение магнитных

частиц к полосам магнитной системы аппарата очистки при сильной вибрации, вызываемой некоторым отставанием перемещения частиц от изменения направления напряжённости поля. Такая вибрация обеспечивает получение весьма чистой (однородной) фракции при магнитном осаждении мелкодисперсных частиц примесей.

Слабомагнитные частицы осаждают в сильномагнитных полях (напряжённость $H = 800 \dots 1600$ кА/м), сильномагнитные – в слабых полях (напряжённость $H = 70 \dots 160$ кА/м) [4, с. 425 – 428].

Пример расчёта процесса магнитного осаждения

Ситуация. Очистка газопылевых выбросов металлургического завода от частиц железа реализуется в магнитном сепараторе. При этом диаметр железной частицы принимается равным $7 \cdot 10^{-4}$ м, плотность частицы – 7850 кг/м³. Магнитная постоянная – $1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м, намагниченность частицы – 100 кА/м, напряжённость магнитного поля – 120 кА/м, градиент напряжённости – $0,1 \cdot 10^{-4}$ А·м, магнитная индукция – 35 Тл. Осаждение стеснённое. Начальная концентрация частиц железа в воздухе – $0,2$ кг п / кг сл. Плотность воздуха – $1,293$ кг/м³, вязкость воздуха – $17,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Определить, какое расстояние до магнита успеет пройти частица железа за $0,01$ мин в процессе магнитного осаждения в воздухе.

Дано: $\tau_{oc} = 0,6$ с, $d = 7 \cdot 10^{-4}$ м, $\rho = 7850$ кг/м³, $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м, $\tau = 100$ кА/м, $H_{grad} = 0,1 \cdot 10^{-4}$ А·м, $B = 35$ Тл, $\bar{x} = 0,2$ кг п/кг сл, $\rho_c = 1,293$ кг/м³, $\mu_c = 17,3 \cdot 10^{-6}$ Па·с.

Найти: H_{oc} .

Рекомендуемый ход решения. Расстояние до магнита

$$h_{oc} = \tau_{oc} \omega_{oc}.$$

Скорость магнитного осаждения частицы (формула (2.62) [16])

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{8\mu_0 \chi H_{grad} H}{\xi \pi d^2 \rho_c}}.$$

Магнитная восприимчивость частицы железа (формула (2.58) [16])

$$\chi = \frac{\tau}{H}.$$

Напряжённость магнитного поля определяется из формулы (2.59) [16]

$$B = (1 + \chi)\mu_0 H,$$

откуда

$$H = \frac{B}{(1 + \chi)\mu_0}.$$

Подставим в формулу (2.58) вместо величины H формулу (2.59) [16]

$$\chi = \frac{\tau}{B} = \frac{\tau}{B}(1 + \chi)\mu_0,$$

$$\frac{\tau}{(1 + \chi)\mu_0}$$

откуда

$$\chi = \frac{\tau\mu_0}{B - \tau\mu_0}, \quad \chi = \frac{100\,000 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4}}{35 - 100\,000 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4}} = 0,56.$$

Тогда

$$H = \frac{35}{(1 + 0,56) \cdot 1,26 \cdot 10^{-4}} = 177\,777 \text{ А/м.}$$

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется в зависимости от значения критерия Рейнольдса при стеснённом осаждении (формула (2.17) [16])

$$\text{Re}_{\text{ст}} = \frac{\text{Ar}\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{\text{Ar}\varepsilon^{4,75}}}.$$

Порозность слоя железных частиц (объёмная доля воздуха)

$$\varepsilon = 1 - \bar{x} \frac{\rho_{\text{сл}}}{\rho}.$$

Плотность слоя:

$$\rho_{\text{сл}} = \frac{1}{\frac{\bar{x}}{\rho} + \frac{1 - \bar{x}}{\rho_c}}, \quad \rho_{\text{сл}} = \frac{1}{\frac{0,2}{7850} + \frac{1 - 0,2}{1,293}} = 1,6 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда

$$\varepsilon = 1 - 0,2 \frac{1,6}{7850} = 0,99.$$

Критерий Архимеда (формула (2.18) [16]):

$$Ar = \frac{d^3 (\rho - \rho_c) \rho_c g}{\mu_c^2},$$

$$Ar = \frac{(3 \cdot 10^{-3}) (7850 - 1.293) \cdot 1.293 \cdot 9.81}{(17.3 \cdot 10^{-6})^2} = 8\,981\,258.$$

Тогда

$$Re_{cr} = \frac{8\,981\,258 \cdot 0,99^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{8\,981\,258 \cdot 0,99^{4,75}}} = 4821 > 500.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления при движении частиц для $Re > 500$ (формула (2.8) [16])

$$\xi = 0,44.$$

Тогда

$$\omega_{oc} = \sqrt{\frac{8 \cdot 1,26 \cdot 10^{-4} \cdot 0,56 \cdot 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 177\,777}{0,44 \cdot 3,14 \cdot (7 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1,293}} = 7,90 \text{ м/с};$$

$$h_{oc} = 0,6 \cdot 7,9 = 4,74 \text{ м.}$$

Ответ: $h_{oc} = 4,74 \text{ м.}$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить, какое расстояние до магнита h_{oc} успеет пройти частица железа нешарообразной формы за время $\tau = 0,8$ мин в процессе магнитного осаждения в воздухе. Магнитная постоянная $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м. Намагниченность частицы $J = 100\,100$ А/м. Градиент напряжённости магнитного поля в аппарате очистки $H_{grad} = 0,12 \cdot 10^{-4}$ А·м. Магнитная индукция частицы $B = 37$ Тл. Осаждение стеснённое. Частицы примесей имеют угловатую форму $\varphi = 0,66$. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в воздухе на входе в аппарат очистки $\bar{x} = 0,3$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 3,3 \cdot 10^{-4}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 7800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,290$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0170 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температу-

ра в аппарате очистки $t = 14$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

2. Определить, какое расстояние до магнита h_{oc} успеет пройти частица железа нешарообразной формы за время $\tau = 0,2$ часа в процессе магнитного осаждения в воздухе. Магнитная постоянная $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м. Намагниченность частицы $J = 101\,000$ А/м. Градиент напряжённости магнитного поля в аппарате очистки $H_{grad} = 0,11 \cdot 10^{-4}$ А·м. Магнитная индукция частицы $B = 36$ Тл. Осаждение стеснённое. Частицы примесей имеют продолговатую форму $\phi = 0,58$. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в воздухе на входе в аппарат очистки $\bar{x} = 0,25$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 3,2 \cdot 10^{-4}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 7870$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0176 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 15$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

3. Определить, какое расстояние до магнита h_{oc} успеет пройти частица железа нешарообразной формы за время $\tau = 2,8$ с в процессе магнитного осаждения в воздухе. Магнитная постоянная $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м. Намагниченность частицы $J = 100\,200$ А/м. Градиент напряжённости магнитного поля в аппарате очистки $H_{grad} = 0,2 \cdot 10^{-4}$ А·м. Магнитная индукция частицы $B = 45$ Тл. Осаждение стеснённое. Частицы примесей имеют пластинчатую форму $\phi = 0,43$. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в воздухе на входе в аппарат очистки $\bar{x} = 0,3$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 3,3 \cdot 10^{-4}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 7800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,290$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0170 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 16$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

4. Определить, какое расстояние до магнита h_{oc} успеет пройти частица железа нешарообразной формы за время $\tau = 0,8$ р в процессе магнитного осаждения в воздухе. Магнитная постоянная $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-4}$ Гн/м. Намагниченность частицы $J = 100\,000$ А/м. Градиент напряжённости магнитного поля в аппарате очистки $H_{grad} = 0,3 \cdot 10^{-4}$ А·м. Магнитная индукция частицы $B = 30$ Тл. Осаждение стеснённое. Частицы примесей имеют округлую форму $\phi = 0,77$. Массовая концентрация (содержание) твёрдых частиц примесей в воздухе на входе в аппарат очистки

$\bar{x} = 0,5$ кг п./кг сл. Масса одной частицы примесей $m = 3 \cdot 10^{-4}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 7000$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,290$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 0,0170 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 20$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

3. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

3.1. ОБЩИЕ ОСНОВЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Общие теоретические основы фильтрации

Фильтрация – процесс разделения неоднородных или однородных систем через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (устройства с отверстиями или порами, неподвижные или подвижные слои пористого или зернистого материала, состоящие из отдельных элементов) под действием различных сил.

Разделение неоднородных систем, состоящих из дисперсионной среды (жидкостей или газа) и взвешенных в ней твёрдых частиц дисперсной фазы, проводят при помощи фильтра, который в простейшем виде является сосудом, разделённым на две части фильтровальной перегородкой.

В процессе фильтрации твёрдая частица дисперсной фазы задерживается на поверхности фильтровальной перегородки, если размер пор на этой поверхности меньше размера частицы. В другом случае меньшая по сравнению с порами частица не может выйти в пору и остаётся на поверхности фильтровальной перегородки. Это происходит, если над входом в пору на поверхности перегородки образуется сводик из нескольких относительно небольших твёрдых частиц, который пропускает дисперсионную среду и задерживает другие частицы. Сводик образуется лишь при достаточно высокой концентрации твёрдых частиц в суспензии. Происходит фильтрация с образованием осадка.

Если размер твёрдой частицы дисперсной фазы меньше или равен размеру поры в самом узком её сечении, то частица может пройти через фильтровальную перегородку вместе с фильтратом [1, с. 187]. Однако она может задерживаться внутри фильтровальной перегородки в результате адсорбции на стенках поры или механического торможения на том её участке, который имеет неправильную форму. Такая застрявшая частица будет уменьшать свободное сечение поры и, соответственно, будет увеличивать вероятность задерживания в данной поре последующих твёрдых частиц дисперсной фазы. Возможен случай, когда отдельная твёрдая частица дисперсной фазы полностью закупоривает пору и делает её непроходимой для других частиц. Таким образом происходит фильтрование с закупориванием (забивкой) пор.

Осаждение (задержка) частиц дисперсной фазы на поверхности фильтровальной перегородки или на внутренней поверхности её пор происходит в результате совокупного действия эффекта касания, а также процессов диффузионного, инерционного и гравитационного осаждения частиц.

Эффект касания возникает при условии соприкосновения частиц примесей с поверхностью волокон, зёрен или других элементов, образующих поверхность пор. Соприкосновение происходит при условии, что траектория частиц примесей проходит от поверхности пор на расстоянии, равном или менее радиуса частицы. Этот процесс протекает по всему объёму порового пространства. Эффективность очистки касанием определяется соотношением характерных размеров пор (каналов) $d_{\text{пк}}$ и частиц $d_3 = 2r_3$.

При $d_3 = d_{\text{пк}}$ наблюдается отсеивание частиц входной поверхностью перегородки с образованием слоя осадка. Такое явление называется *ситовым эффектом*.

Процесс осаждения частиц примесей на поверхность пор за счёт *броуновской диффузии* обусловлен хаотическим тепловым движением молекул дисперсной среды, постепенно соударяющихся с частицами примесей. В результате таких соударений частицы смещаются с линией тока и осаждаются на поверхности пор фильтровальной перегородки. Чем меньше частицы примесей (до 0,1 мкм) и меньше скорость их движения (до 1 м/с), тем эффективнее процесс захвата частиц примесей за счёт броуновской диффузии.

Процесс инерционного осаждения частиц примесей на поверхности пор фильтровальной перегородки происходит из-за воздействия на частицы сил инерции, возникающих при отклонении траектории движения частиц от прямолинейного движения. При огибании потоком неоднородной системы криволинейной поверхности пор частицы, стремясь сохранить своё прямолинейное движение, переходят с одной линии тока на другую и касаются поверхности пор.

Инерционный эффект осаждения частиц примесей практически отсутствует при движении частиц размерами менее 1 мкм со скоростью 1 м/с. Возникновение режима инерционного осаждения характеризуется критическим числом $St_{\text{кр}}$. При $St < St_{\text{кр}}$ эффективность инерционного осаждения $\eta_{\text{и}} = 0$. Для условий вязкого обтекания элементов поверхности пор $St_{\text{кр}} = 4,3 \pm 0,1$ при $Re = 0,1$, $St_{\text{кр}} = 0,1 \dots 0,2$ при $Re > 0,1$.

Процесс гравитационного осаждения частиц примесей на поверхность пор фильтровальной перегородки может происходить в результате их оседания со скоростью витания (уноса) $\omega_{\text{св}}$. В реальных фильтрах вследствие малых скоростей витания частиц примесей по сравнению со скоростью фильтрования гравитационный механизм осаждения частиц не играет заметной роли. Этот эффект становится заметным лишь при фильтровании аэрозолей с частицами диаметром до 1 мкм и со скоростью $\omega_{\text{а}} < 0,05$ см/с.

В фильтровальных перегородках из диэлектрических материалов на процесс фильтрации существенное влияние оказывает наличие электрических зарядов на поверхности пор, что значительно увеличивает эффективность очистки неоднородных систем от примесей. Например, при фильтрации запылённого газа с частицами пыли размером $d = 0,34$ мкм через фильтровальное перхлорвиниловое волокно, несущее заряд, при скорости фильтрации $0,01$ м/с достигается эффективность очистки $\eta = 99,9999\%$, а после снятия заряда в тех же условиях эффективность уменьшается до $\eta_0 = 90\%$.

Примеры расчёта процесса фильтрации

Ситуация. В процессе очистки через фильтр проходит 1 м³/с загрязнённого примесями воздуха. Концентрация частиц примесей на выходе из фильтра понижается до $0,05$ мг/м³. Масса образовавшегося шлама – 1 кг. Поверхность фильтрации – 15 м². Средний размер частиц примесей – $0,1$ мкм, средний размер пор фильтровальной перегородки – $0,20$ мкм. Коэффициент формы и вида пор – $0,011$. Температура загрязнённого воздуха – 40 °С. Молярная масса воздуха M_c – 29 кг/кмоль. Газовая постоянная – 8310 Дж/(кмоль·К). Вязкость дисперсионной среды (воздуха) – $19,5$ Па·с. Плотность дисперсионной среды (воздуха) – $1,154$ кг/м³. Плотность частиц примесей – 1500 кг/м³. Эффективность фильтрации за счёт электрических зарядов – $0,9$. Эффективность фильтрации за счёт инерционного эффекта $\eta_{и} = 3,67St$.

Определить время фильтрации загрязнённого воздуха от частиц примесей.

Дано: $x_k = 0,05 \cdot 10^{-6}$ кг/м³, $q_v = 1$ м³/с, $Q_{шл} = 1,1$ кг, $S = 15$ м², $d_0 = 0,1$ мкм, $d_{эк} = 0,2$ мкм, $k = 0,011$, $t = 40$ °С, $M_c = 29$ кг/кмоль, $R = 8310$ Дж/(кмоль·К), $\mu_c = 19,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с, $\rho_c = 1,154$ кг/м³, $\rho = 1500$ кг/м³, $\eta_0 = 0,9$, $\eta_{и} = 3,67St$.

Найти: τ .

Рекомендуемый ход решения. Время фильтрации загрязнённого воздуха от частиц примесей

$$\tau = \frac{NS}{\eta q_v x_k}.$$

Удельная пылеемкость фильтра

$$N = \frac{Q_{шл}}{S}, \quad N = \frac{1,1}{15} = 0,073 \text{ кг/м}^2.$$

Эффективность фильтрации (формула (3.9) [16])

$$\eta = 1 - (1 - \eta_k)(1 - \eta_d)(1 - \eta_{и})(1 - \eta_0)(1 - \eta_0).$$

Эффективность очистки касанием определяется соотношением d_3 и $d_{э\kappa}$. Тогда как

$$d_3 = 0,1 \text{ мкм} < d_{э\kappa} = 0,2 \text{ мкм},$$

то

$$\eta_{\kappa} = 0,$$

т.е. отсутствует ситовый эффект.

Эффективность захвата частиц примесей за счёт броуновской диффузии (формула (3.2) [16])

$$\eta_{\text{д}} = k(d_{э\kappa} d_3 \omega_{\phi})^{-2/3}.$$

Скорость фильтрования

$$\omega_{\phi} = \frac{q_v}{S}, \quad \omega_{\phi} = \frac{1}{15} = 0,066 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Тогда

$$\eta_{\text{д}} = 0,011(0,2 \cdot 0,1 \cdot 0,066)^{-2/3} = 0,87.$$

Эффективность захвата частиц примесей за счёт инерционного эффекта (из условия задачи)

$$\eta_{\text{и}} = 3,67 \text{St}.$$

Критерий Стокса (формула (3.4) [16])

$$\text{St} = \frac{d_3 \omega_{\phi} \rho k_{\kappa}}{9\mu_c}.$$

Поправка Кенингема–Милликена на увеличение подвижности частиц (формула (3.5) [16])

$$k_{\kappa} = 1 + \left(1,257 + 0,4e^{-\frac{0,55d_3}{\lambda}} \right) \frac{2\lambda}{d_3}.$$

Средняя длина свободного пробега газовых молекул (формула (3.6) [16])

$$\lambda = \frac{\mu_c}{\rho_c} \left(\frac{\pi M}{2RT} \right)^{0,5}, \quad \lambda = \frac{19,5 \cdot 10^{-6}}{1,154} \left(\frac{3,14 \cdot 29}{2 \cdot 8310(273 + 40)} \right)^{0,5} = 0,07 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Тогда

$$k_{\kappa} = 1 + \left(1,257 + 0,4e^{-\frac{0,55 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}}{0,07 \cdot 10^{-6}}} \right) \frac{2 \cdot 0,07 \cdot 10^{-6}}{0,1 \cdot 10^{-6}} = 3,98;$$

$$St = \frac{0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,066 \cdot 1500 \cdot 3,98}{9 \cdot 19,5 \cdot 10^{-6}} = 0,22 ;$$

$$\eta_{и} = 3,67 \cdot 0,22 = 0,8 .$$

Эффективность захвата частиц примесей за счёт гравитационного осаждения (формула (3.7) [16])

$$\eta_{г} = \frac{St}{2Fr} .$$

Критерий Фруда (формула (3.8) [16]):

$$Fr = \frac{\omega_{\Phi}^2}{d_3}, \quad Fr = \frac{0,066^2}{0,1 \cdot 10^{-6}} = 43\,560 .$$

Тогда

$$\eta_{г} = \frac{0,22}{2 \cdot 43\,560} = 2,52 \cdot 10^{-6} ;$$

$$\eta = 1 - (1 - 0)(1 - 0,87)(1 - 0,8)(1 - 2,52 \cdot 10^{-6})(1 - 0,9) = 0,997 .$$

Концентрация частиц примесей на входе в фильтр определяется их формулы (3.9) [16]

$$\eta = \frac{x_{н} - x_{к}}{x_{н}} ,$$

откуда

$$x_{н} = \frac{x_{к}}{1 - \eta}, \quad x_{н} = \frac{0,05 \cdot 10^{-6}}{1 - 0,997} = 16,66 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3 .$$

Тогда

$$\tau = \frac{0,073 \cdot 15}{0,997 \cdot 1 \cdot 16,66 \cdot 10^{-6}} = 65\,924 \text{ с} = 18,31 \text{ ч} .$$

Ответ: $\tau = 65\,924 \text{ с}$.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить время фильтрования загрязнённого воздуха от частиц примесей τ . Концентрация частиц примесей на выходе из фильтра понижается до $x_{к} = 0,047 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$. В процессе очистки через фильтр проходит $q_v = 0,9 \text{ м}^3/\text{с}$ загрязнённого воздуха. Масса образовавшегося шлама $Q_{шл} = 0,9 \text{ кг}$. Поверхность фильтрования $S = 14 \text{ м}^2$. Средний размер пор фильтровальной перегородки $d_{\text{эк}} = 2,1 d_3$ мкм. Коэффициент

формы и вида пор $k = 0,015$. Молярная масса воздуха $M_c = 29$ кг/кмоль. Газовая постоянная $R_c = 8310$ Дж/(кмоль·К). Эффективность фильтрования за счёт электрических зарядов на перегородке $\eta_b = 0,999$. Эффективность фильтрования за счёт инерционного эффекта $\eta_{in} = 4St$. Масса одной частицы примесей $m = 1,7 \cdot 10^{-8}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2400$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,290$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 19,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 45$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

2. Определить время фильтрования загрязнённого воздуха от частиц примесей τ . Концентрация частиц примесей на выходе из фильтра понижается до $x_k = 0,053 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. В процессе очистки через фильтр проходит $q_v = 0,94$ м³/с загрязнённого воздуха. Масса образовавшегося шлама $Q_{шл} = 0,96$ кг. Поверхность фильтрования $S = 12$ м². Средний размер пор фильтровальной перегородки $d_{эк} = 1,9d$, мкм. Коэффициент формы и вида пор $k = 0,016$. Молярная масса воздуха $M_c = 29$ кг/кмоль. Газовая постоянная $R_c = 8310$ Дж/(кмоль·К). Эффективность фильтрования за счёт электрических зарядов на перегородке $\eta_b = 0,98$. Эффективность фильтрования за счёт инерционного эффекта $\eta_{in} = 3,9St$. Масса одной частицы примесей $m = 1,65 \cdot 10^{-8}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2350$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 19,51 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 35$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

3. Определить время фильтрования загрязнённого воздуха от частиц примесей τ . Концентрация частиц примесей на выходе из фильтра понижается до $x_k = 0,02 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. В процессе очистки через фильтр проходит $q_v = 2$ м³/с загрязнённого воздуха. Масса образовавшегося шлама $Q_{шл} = 1,2$ кг. Поверхность фильтрования $S = 20$ м². Средний размер пор фильтровальной перегородки $d_{эк} = 2,5d$, мкм. Коэффициент формы и вида пор $k = 0,017$. Молярная масса воздуха $M_c = 29$ кг/кмоль. Газовая постоянная $R_c = 8310$ Дж/(кмоль·К). Эффективность фильтрования за счёт электрических зарядов на перегородке $\eta_b = 0,999$. Эффективность фильтрования за счёт инерционного эффекта $\eta_{in} = 4St$. Масса одной частицы примесей $m = 2,5 \cdot 10^{-8}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,290$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 19,5 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 35$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

4. Определить время фильтрования загрязнённого воздуха от частиц примесей τ . Концентрация частиц примесей на выходе из фильтра понижается до $x_k = 0,05 \cdot 10^{-6}$ кг/м³. В процессе очистки через фильтр проходит $q_v = 2,4$ м³/с загрязнённого воздуха. Масса образовавшегося шлама $Q_{\text{шл}} = 0,6$ кг. Поверхность фильтрования $S = 10$ м². Средний размер пор фильтровальной перегородки $d_{\text{жк}} = 1,6d$, мкм. Коэффициент формы и вида пор $k = 0,018$. Молярная масса воздуха $M_c = 29$ кг/кмоль. Газовая постоянная $R_c = 8310$ Дж/(кмоль·К). Эффективность фильтрования за счёт электрических зарядов на перегородке $\eta_e = 0,97$. Эффективность фильтрования за счёт инерционного эффекта $\eta_{\text{и}} = 2,9St$. Масса одной частицы примесей $m = 3,5 \cdot 10^{-8}$ кг. Плотность частиц примесей $\rho = 2900$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистого воздуха) $\mu_{c0} = 19,51 \cdot 10^{-6}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 30$ °С. Константа Сазерленда для дисперсионной газовой среды (воздуха) $C_c = 124$.

3.2. ФИЛЬТРОВАНИЕ ПРИ РАЗНОСТИ ДАВЛЕНИЙ

Теоретические основы фильтрования при разности давлений

Фильтрование – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсной средой) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (как правило, устройства с отверстиями или порами диаметром до 0,1 мм) под действием разности давления (до и после перегородки), создаваемой насосами либо гравитацией, при этом перегородка задерживает твёрдые частицы или капли дисперсной фазы (вредные примеси), пропуская дисперсионную среду.

Разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки создают разными способами.

Если пространство над неоднородной системой сообщают с источником сжатого газа (ресивером) или пространство под фильтровальной перегородкой присоединяют к источнику вакуума (ресиверу), то происходит процесс *фильтрования при постоянной разности давлений*, поскольку давление в ресиверах поддерживается постоянным. При этом скорость процесса уменьшается в связи с увеличением сопротивления слоя осадка возрастающей толщины. Аналогичный процесс фильтрования происходит под действием постоянной разности давления, обусловленной гидростатическим давлением слоя неоднородной системы постоянной высоты, находящегося над фильтровальной перегородкой.

Если неоднородную систему на фильтр подают поршневым насосом, производительность которого постоянна, то осуществляется про-

цесс *фильтрации при постоянной скорости*, при этом разность давлений увеличивается вследствие увеличения сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если неоднородную систему подают на фильтр центробежным насосом, производительность которого уменьшается вследствие увеличения сопротивления осадка возрастающей толщины, что обуславливает повышение разности давления и одновременное уменьшение скорости процесса, то осуществляется процесс *фильтрации при переменных разности давлений и скорости*.

Если однородную систему или чистую дисперсионную среду пропускают сквозь слой осадка неизменной толщины, то происходит процесс *фильтрации при постоянных разности давления и скорости* (процессы промывки или продувки, процеживания).

Обычно ввиду небольшого размера пор в слое осадка и фильтровальной перегородки, а также малой скорости движения дисперсионной среды в порах, можно считать, что фильтрация протекает в ламинарной области.

Величина ΔP при соответствующих условиях численно равна гидравлическому сопротивлению зернистого или пористого слоя ΔP .

Величина сопротивления слоя осадка $R_{ос}$ тем больше, чем меньше пористость осадка и больше удельная поверхность составляющих его твёрдых частиц и больше толщина (высота) осадка. На величину $R_{ос}$ влияют также размер и форма твёрдых частиц осадка.

Величина сопротивления фильтровальной перегородки $R_{фл}$ в процессе фильтрации принимается постоянной.

В случае проведения процесса фильтрации при постоянной разности давления $\Delta P = \text{const}$, условно неизменной температуре для фильтра данной конструкции и выбранной фильтровальной перегородке все входящие в формулу константы фильтрации величины, за исключением V_c и τ , постоянны.

Процесс фильтрации часто сопровождается стеснённым или свободным осаждением твёрдых частиц дисперсной фазы, кристаллизацией дисперсионной среды и другими процессами, поэтому все расчёты являются приблизительными. Учитывая это, аппараты фильтрации рассчитывают с некоторым «запасом» по производительности [7, с. 63].

Примеры расчёта процесса фильтрации при разности давлений

Ситуация. В научно-исследовательской лаборатории проводится экспериментальное фильтрация при постоянной разности давлении загрязнённой суспензии сточной воды. Объём загрязнённой суспензии

на фильтре – 10 м^3 . Поверхность фильтрования – 7 м^2 . В результате эксперимента для данного давления получен тангенс угла наклона прямой $\text{tg}\beta = 0,57$. Сопротивлением фильтрующей перегородки пренебрегают. На 1 м^3 исходной загрязнённой суспензии получается $0,92 \text{ м}^3$ условно чистого фильтрата.

Определить время фильтрования и скорость фильтрования в данный момент времени.

Дано: $V_{\text{сл}} = 10 \text{ м}^3$, $S = 7 \text{ м}^2$, $\Delta P = \text{const}$, $\text{tg}\beta = 0,57$, $R_{\text{фп}} = 0$, $V_{\text{сл}0} = 1 \text{ м}^3$, $V_{\text{с}0} = 0,92 \text{ м}^3$.

Найти: τ , $\omega_{\text{ф}}$.

Рекомендуемый ход решения. Время фильтрования для $\Delta P = \text{const}$ определяется из уравнения (3.18) [16]

$$V_{\text{с}}^2 + 2V_{\text{с}}C = K\tau,$$

откуда

$$\tau = \frac{V_{\text{с}}^2 + 2V_{\text{с}}C}{K}.$$

Объём фильтрата (чистой дисперсионной среды):

$$V_{\text{с}} = V_{\text{с}0} \frac{V_{\text{сл}}}{V_{\text{сл}0}}, \quad V_{\text{с}} = 0,92 \frac{10}{1} = 9,2 \text{ м}^3.$$

Константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки, (формула (3.19) [16]):

$$C = \frac{R_{\text{фп}}S}{r_{\text{в}} c_{\text{в}}}, \quad C = \frac{0 \cdot 7}{r_{\text{в}} c_{\text{в}}} = 0 \text{ м}^3 \text{ фп}.$$

Константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и дисперсионной среды при наличии данных лабораторных экспериментов определяется по формуле

$$K = \frac{1}{\text{tg}\alpha}, \quad K = \frac{1}{0,57} = 1,75 \text{ м}^6/\text{с}.$$

Тогда

$$\tau = \frac{9,2^2 + 2 \cdot 9,2 \cdot 0}{1,75} = 58,88 \text{ с}.$$

Скорость фильтрования в данный момент времени ($\tau = 58,88 \text{ с}$) определяется по формуле (3.24) [16]

$$\omega_{\Phi} = \frac{dV_c}{Sd\tau} = \frac{K}{2S(V_c + C)}, \quad \omega_{\Phi} = \frac{1,75}{2 \cdot 7(9,2 + 0)} = 0,0136 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

$$\text{Ответ: } \tau = 58,88 \text{ с}, \quad \omega_{\Phi} = 0,0136 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Ситуация. На машиностроительном предприятии проводится очистка сточной воды от частиц примесей путём фильтрования при постоянной разности давлений. Разность давлений – $6,8 \cdot 10^4$ Па, высота слоя осадка на фильтре – 10 мм, скорость фильтрования – $57,3 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с). Плотность твёрдых частиц дисперсной фазы – 1500 кг/м³, массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии – 14%, вязкость чистой дисперсионной среды (воды) – $1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с, плотность воды – 1000 кг/м³. Влажность осадка – 61% (масс.). Площадь фильтрования – 1 м².

Определить время фильтрования загрязнённой суспензии сточной воды на фильтре при постоянной разности давлений.

Дано: $\Delta P = 6,8 \cdot 10^4$ Па, $h_{\text{шл}} = 10 \cdot 10^{-3}$ м, $\omega_{\Phi} = 57,3 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с), $\rho = 1500$ кг/м³, $\bar{x} = 0,14$ кг п/кг сл., $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с, $\rho_c = 1000$ кг/м³, $\varepsilon = 0,61$, $S = 1$ м².

Найти: τ .

Рекомендуемый ход решения. Время фильтрования загрязнённой суспензии при $\Delta P = \text{const}$

$$\tau = \frac{1}{K} \frac{h_{\text{шл}}^2}{X_0^2} + \frac{2C}{K} \frac{h_{\text{шл}}}{x_0}.$$

Константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и дисперсионной среды, (формула (3.22) [16])

$$K = 2\Delta P S^2 / (\mu_c \bar{r} \bar{c}).$$

Удельное массовое сопротивление слоя осадка (формула (3.13) [16])

$$\bar{r} = \frac{r_v}{\rho}.$$

Удельное объёмное сопротивление слоя осадка (формула (3.15) [16])

$$r_v = \frac{\Delta P}{\mu_c h_{\text{шл}} \omega_{\Phi}}, \quad r_v = \frac{6,8 \cdot 10^4}{1,005 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 57,3 \cdot 10^{-6}} = 1,18 \text{ м/м}^3.$$

Тогда

$$\bar{r} = \frac{1,18 \cdot 10^{14}}{1500} = 7,87 \cdot 10^{10} \text{ м/кг.}$$

Масса сухого твёрдого вещества в осадке, отлагающемся на фильтре при прохождении через фильтрующую поверхность 1 м³ фильтрата,

$$\bar{c} = \frac{\bar{x}\rho_c(1-\varepsilon)}{1-(\varepsilon+\bar{x})}.$$

Тогда

$$\bar{c} = \frac{0,14 \cdot 1000(1-0,61)}{1-(0,61+0,14)} = 218,4 \text{ кг/м}^3;$$

$$K = \frac{2 \cdot 6,8 \cdot 10^4 \cdot 1^2}{1,005 \cdot 10^{-3} \cdot 7,87 \cdot 10^{10} \cdot 218,4} = 7,87 \cdot 10^{-6} \text{ м}^6/\text{с.}$$

Отношение объёма осадка на фильтрате к объёму полученного фильтрата

$$x_o = \frac{\bar{x}\rho_c}{\rho_{\text{шл}}(1-(\varepsilon+\bar{x}))}.$$

Плотность влажного шлама

$$\rho_{\text{шл}} = \frac{\rho\rho_c}{\rho_c + (\rho - \rho_c) \cdot \varepsilon}, \quad \rho_{\text{шл}} = \frac{1500 \cdot 1000}{1000 + (1500 - 1000) \cdot 0,61} = 1149 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда

$$x_o = \frac{0,14 \cdot 1000}{1149(1-(0,61+0,14))} = 0,487.$$

Константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки, (формула (3.19) [16])

$$C = \frac{R_{\text{фп}}S}{\bar{r} \bar{c}}.$$

Сопротивление фильтровальной перегородки

$$R_{\text{фп}} = \frac{\Delta P}{\mu_c \omega_{\text{ф}}}, \quad R_{\text{фп}} = \frac{6,8 \cdot 10^4}{1,005 \cdot 10^{-3} \cdot 57,3 \cdot 10^{-6}} = 1,18 \cdot 10^{12} \frac{\text{М}}{\text{м}^2};$$

$$C = \frac{1,18 \cdot 10^{12} \cdot 1}{7,87 \cdot 10^{10} \cdot 218,4} = 0,068 \text{ м}^3;$$

$$\tau = \frac{1}{7,87 \cdot 10^{-6}} \frac{(10 \cdot 10^{-3})^2}{0,487^2} + \frac{2 \cdot 0,068}{7,87 \cdot 10^{-6}} \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0,487} = 408 \text{ с.}$$

Ответ: $\tau = 408 \text{ с.}$

Ситуация. В лабораторных условиях были получены следующие данные по фильтрованию:

Время, с	130	800
Объём фильтрата, м ³	0,27	0,081

Фильтр состоит из 12 рам размерами 500×500 мм. Всего в лабораторных условиях получено 0,275 м³ условно чистого фильтрата. Фильтрование происходит при постоянной разности давлений.

Определить скорость фильтрования загрязнённой суспензии.

Дано: $n = 12$, $a = 0,5 \text{ м}$, $b = 0,5 \text{ м}$, $\tau_1 = 130 \text{ с}$, $V_{c1} = 0,027 \text{ м}^3$, $\tau_2 = 800 \text{ с}$, $V_{c2} = 0,081 \text{ м}^3$, $V_c = 0,275 \text{ м}^3$, $\Delta P = \text{const}$.

Найти: ω_ϕ .

Рекомендуемый ход решения. Скорость фильтрования загрязнённой суспензии в данный момент времени (формула (3.24) [16])

$$\omega_\phi = \frac{dV_c}{S d\tau} = \frac{K}{2S(V_c + C)}.$$

Поверхность фильтрования

$$S = 2nab, \quad S = 2 \cdot 12 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 6 \text{ м}^2.$$

Константы фильтрования определяются из системы уравнений (формула (3.18) [16])

$$\begin{cases} V_{c1}^2 + 2V_{c1}C = K\tau_1; \\ V_{c2}^2 + 2V_{c2}C = K\tau_2, \end{cases}$$

откуда константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и дисперсионной среды,

$$K = \frac{V_{c1}^2 + 2V_{c1}C}{\tau_1}.$$

Константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки,

$$C = \frac{K\tau_2 - V_{c2}^2}{2V_{c2}} = \frac{V_{c2}^2 + 2V_{c1}C}{\tau_1} \frac{\tau_2}{2V_{c2}} - \frac{V_{c2}}{2},$$

откуда

$$C = \frac{\frac{V_{c1}^2}{2V_{c2}} \frac{\tau_2}{\tau_1} - \frac{V_{c2}}{2}}{1 - \frac{V_{c1}}{V_{c2}} \frac{\tau_2}{\tau_1}}, \quad C = \frac{0,027^2 \cdot 800 - 0,081}{2 \cdot 0,081 \cdot 130 - 2} = 0,012 \text{ м}^3.$$

Тогда

$$K = \frac{0,027^2 + 2 \cdot 0,027 \cdot 0,012}{130} = 0,0106 \cdot 10^{-3} \text{ м}^6/\text{с};$$

$$\omega_\phi = \frac{0,0106 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6 \cdot (0,275 + 0,012)} = 3,0778 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Ответ: $\omega_\phi = 3,0778 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить время фильтрования τ и скорость фильтрования ω_ϕ в данный момент времени $V_{cл} = 9 \text{ м}^3$ загрязнённой суспензии на фильтре ρ поверхностью фильтрования $S = 1,1 \text{ м}^2$ при постоянном давлении, если в результате эксперимента для данного давления получен тангенс угла наклона прямой τ/V_c , равный $\text{tg}\beta = 0,55$. Сопротивление фильтрующей перегородки $R_{фп} = 15r' \text{ м}/\text{м}^2$. Удельное объёмное сопротивление слоя осадка $r_v = 10^{12} \text{ м}_c \text{ м}/\text{м}^3$. На $V_{cл0} = 0,9 \text{ м}^3$ исходной загрязнённой суспензии получается $V_{c0} = 0,8 \text{ м}^3$ условно чистого фильтрата. Массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии $\bar{x}_н = 12\%$ (масс.). Массовая концентрация твёрдой фазы в осадке после слива осветлённой воды $\bar{x}_{шл} = 55\%$ (масс.). Плотность частиц примесей $\rho = 1800 \text{ кг п.}/\text{м}^3 \text{ п.}$ Плотность дисперсионной среды (чистой воды) $\rho_{c0} = 999 \text{ кг дс.}/\text{м}^3 \text{ дс.}$ Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,003 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с.}$ Температура в аппарате очистки $t = 35 \text{ }^\circ\text{C.}$

2. Определить время фильтрования загрязнённой суспензии сточной воды на фильтре τ при постоянной разности давлений, равной $\Delta P = 78 \text{ 000 Па.}$ Высота слоя осадка на фильтре $h_{шл} = 0,02 \text{ м.}$ Скорость фильтрования $\omega_\phi = 77,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$ Площадь фильтрования $S = 1,2 \text{ м}^2$. Массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии $\bar{x}_н = 12\%$ (масс.). Массовая концентрация твёрдой фазы в осадке после слива осветлённой воды $\bar{x}_{шл} = 51\%$ (масс.). Плотность твёрдых частиц дисперсионной фазы $\rho = 1500 \text{ кг}/\text{м}^3$. Вязкость чистой дисперсионной среды (воды) $\mu_c = 1,006 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с.}$ Плотность чистой дисперсионной среды (воды) $\rho_{c0} = 1010 \text{ кг}/\text{м}^3$. Температура в аппарате очистки $t = 12 \text{ }^\circ\text{C.}$

3. В лабораторных условиях были получены следующие данные по фильтрованию:

Время, τ_i , с	200	600
Объём фильтрата, V_{ci} , м ³	0,5	0,03

Фильтр состоит из $n = 10$ рам размерами $a = 300 \times b = 300$ мм. Всего в лабораторных условиях получено $V_c = 0,5$ м³ условно чистого фильтрата. Фильтрование происходит при постоянной разности давлений. Определить скорость фильтрования загрязнённой суспензии ω_ϕ .

4. В лабораторных условиях были получены следующие данные по фильтрованию:

Время, τ_i , с	100	300
Объём фильтрата, V_{ci} , м ³	0,3	0,09

Фильтр состоит из $n = 20$ рам размерами $a = 450 \times b = 450$ мм. Всего в лабораторных условиях получено $V_c = 0,35$ м³ условно чистого фильтрата. Фильтрование происходит при постоянной разности давлений. Определить скорость фильтрования загрязнённой суспензии ω_ϕ .

3.3. ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

Теоретические основы центробежного фильтрования

Центробежное фильтрование (центрифугрование) – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсионной среды) при их движении через цилиндрические твёрдые фильтровальные перегородки под действием разности давлений (до и после перегородки), создаваемой полем центробежных сил; при этом перегородка задерживает твёрдые частицы дисперсной фазы (вредные примеси) и пропускает дисперсионную среду.

Сущность процесса центробежного фильтрования. Процессы центробежного фильтрования проводят в *фильтрующих вращающихся центрифугах.*

Неоднородную систему помещают внутрь цилиндра с перфорированными стенками. Вращением цилиндра создают центробежное ускорение, под действием которого дисперсионная среда и твёрдые частицы примесей устремляются к стенкам ротора; при этом твёрдые частицы примесей задерживаются на внутренней поверхности цилиндра, а дисперсионная среда проходит через поры и стекает в нижнюю часть аппарата. С течением времени происходит постепенное увеличение толщины осадка и его уплотнения, а количество дисперсионной среды в аппарате непрерывно уменьшается. Результатом реализации процесса центробежного фильтрования является разделение неодно-

родной системы на *фугат* (осветлённая дисперсионная среда) и влажный осадок (шлам).

Процесс центробежного фильтрования включает в себя две главные стадии:

1) центробежное стеснённое осаждение частиц примесей (вместе с дисперсионной средой) к цилиндрическим стенкам аппарата;

2) фильтрование дисперсионной среды сквозь поры фильтровальной перегородки (стенок аппарата) и сквозь слой осадка частиц примесей с постепенно увеличивающейся толщиной.

Фактор разделения является важнейшей характеристикой центробежного фильтрования. Поэтому расчёт скорости осаждения в поле центробежных сил может быть произведён по стандартным уравнениям фильтрования при разности давлений, но при подстановке в них вместо критерия Архимеда произведения Agk_p для фильтровальных и отстойных центрифуг [1, с. 213–214].

Примеры расчёта процесса центробежного фильтрования

Ситуация. На одной из стадий городских очистных сооружений осуществляется очистка сточной воды путём центрифугирования. Время фильтрования – 12 мин. Высота центрифуги – 1 м, средний радиус вращения центрифуги – 0,7 м, расстояние от оси вращения до поверхности осадка – 0,6 м, до стенок центрифуги – 0,8 м. Константа, характеризующая конструкцию данной центрифуги, – 1,1. Окружная скорость вращения центрифуги – 2 с^{-1} . Удельное массовое сопротивление слоя осадка – $8 \cdot 10^{10} \text{ м/кг}$. Масса сухого твёрдого вещества в осадке, отлагающемся в центрифуге при прохождении через фильтрующую поверхность 1 м^3 фильтрата, 220 кг/м^3 . Вязкость дисперсионной среды – $1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Плотность дисперсионной среды – 1000 кг/м^3 . Плотность частиц загрязнений – 1800 кг/м^3 .

Определить скорость центробежного фильтрования твёрдых загрязнений из сточной воды.

Дано: $\tau = 720 \text{ с}$, $L = 1 \text{ м}$, $r = 0,7 \text{ м}$, $r_1 = 0,8 \text{ м}$, $r_2 = 0,6 \text{ м}$, $b = 1,1 \text{ м}$, $\omega_{\text{окр}} = 6 \text{ м/с}$, $\bar{r} = 8 \cdot 10^{10} \text{ м/кг}$, $\bar{c} = 220 \text{ кг/м}^3$, $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\rho_c = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$.

Найти: $\omega_{\text{ф}}$.

Рекомендуемый ход решения. Скорость центробежного фильтрования (формула (3.12) [16])

$$\omega_{\text{ф}} = \frac{\Delta P_{\text{ц}}}{\mu_c \left(\bar{r} \bar{c} \frac{v_c}{S} + R_{\text{фп}} \right)}.$$

Разность давлений при центробежном фильтровании (формула (3.39) [16])

$$\Delta P_{ц} = \rho_c \omega^2 \frac{r_1^2 - r_2^2}{2}.$$

Угловая скорость вращения центрифуги определяется из формулы (3.28) [16]

$$\omega_{окр} = \omega r,$$

откуда

$$\omega = \omega_{окр} / r, \quad \omega = 6 / 0,7 = 8,57 \text{ с}^{-1}.$$

Тогда

$$\Delta P_{ц} = 1000 \cdot 8,57^2 \cdot \frac{0,8^2 - 0,6^2}{2} = 10 \ 282 \text{ Па}.$$

Объём фильтрата, полученного в результате фильтрования, определяется из формулы (3.34) [16]

$$Q_{ц} = v_c / \phi,$$

откуда

$$v_c = Q_{ц} \phi.$$

Производительность центробежного фильтрования (формула (3.34) [16])

$$Q_{ц} = \frac{\Delta P_{ц} S}{\mu_c r_v h_{шл}}.$$

Средняя поверхность фильтрования (формула (3.38) [16])

$$S = 2prL, \quad S = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,7 \cdot 1 = 4,4 \text{ м}^2.$$

Удельное объёмное сопротивление слоя осадка определяется из формулы (3.13) [16]

$$\bar{r} = \frac{r_v}{\rho},$$

откуда

$$r_v = \bar{r} \rho, \quad r_v = 8 \cdot 10^{10} \cdot 1800 = 144 \cdot 10^{12} \text{ м/м}^3.$$

Толщина осадка (формула (3.40) [16])

$$h_{шл} = \frac{r_1 - r_2}{b}, \quad h_{шл} = \frac{0,8 - 0,6}{1,1} = 0,18 \text{ м}.$$

Тогда

$$Q_{ц} = \frac{10 \ 282 \cdot 4,4}{1,005 \cdot 10^{-3} \cdot 144 \cdot 10^{12} \cdot 0,18} = 1,74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$v_c = 1,74 \cdot 10^{-6} \cdot 720 = 0,00125 \text{ м}^3.$$

Сопротивление фильтровальной перегородки (стенок центрифуги) определяется из формулы (3.17) [16]

$$v_c^2 + 2v_c \frac{R_{\text{фп}} S}{\bar{r}^* \bar{c}} = \frac{2\Delta P_{\text{ц}} S^2}{\mu_c \bar{r} \bar{c}} \tau,$$

откуда

$$R_{\text{фп}} = \frac{\bar{r} \bar{c}}{2v_c S} \left(\frac{2\Delta P_{\text{ц}} S^2 \tau}{\mu_c \bar{r} \bar{c}} - v_c^2 \right),$$

$$\begin{aligned} R_{\text{фп}} &= \frac{8 \cdot 10^{10} \cdot 220}{2 \cdot 0,00125 \cdot 4,4} \cdot \left(\frac{2 \cdot 10 \cdot 282 \cdot 4,4^2 \cdot 720}{1,005 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{10} \cdot 220} - (0,00125)^2 \right) = \\ &= 2593 \cdot 10^{10} \frac{\text{М}}{\text{М}^2}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\omega_{\text{ф}} = \frac{10 \cdot 282}{1,005 \cdot 10^{-3} \left(8 \cdot 10^{10} \cdot 220 \frac{0,00125}{4,4} + 2593 \cdot 10^{10} \right)} = 0,39 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{М}^2 \cdot \text{с}).$$

Ответ: $\omega_{\text{ф}} = 0,39 \text{ м}^3/(\text{М}^2 \cdot \text{с}).$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить скорость центробежного фильтрования твёрдых загрязнений из сточной воды $\omega_{\text{ф}}$. Время фильтрования $\tau = 920$ с. Высота центрифуги $L = 1,1$ м. Средний радиус вращения центрифуги $r = 0,75$ м. Расстояние от оси вращения до поверхности осадка $r_2 = 0,65$ м, до стенок центрифуги $r_1 = 0,85$ м. Константа, характеризующая конструкцию центрифуги, $b = 1,3$. Окружная скорость вращения центрифуги $\omega_{\text{кр}} = 8$ м/с. Удельное объёмное сопротивление слоя осадка $r_v = 100 \cdot 10^{12}$ м/м³. Массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии $\bar{x}_{\text{н}} = 15\%$ (масс.). Массовая концентрация твёрдой фазы в осадке после слива осветлённой воды $\bar{x}_{\text{шт}} = 52\%$ (масс.). Плотность частиц примесей $\rho = 1800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) $\rho_{\text{с0}} = 998$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_c = 1,002 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 15$ °С.

2. Определить скорость центробежного фильтрования твёрдых загрязнений из сточной воды $\omega_{\text{ф}}$. Время фильтрования $\tau = 20$ мин. Высота центрифуги $L = 3$ м. Средний радиус вращения центрифуги $r = 1,5$ м. Расстояние от оси вращения до поверхности осадка $r_2 = 1,0$ м, до стенок центрифуги $r_1 = 1,05$ м. Константа, характеризующая конструкцию центрифуги, $b = 1,3$. Окружная скорость вращения центрифуги $\omega_{\text{окр}} = 10$ м/с. Удельное объёмное сопротивление слоя осадка $r_v = 100 \cdot 10^{12}$ м/м³. Массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии $\bar{x}_n = 25\%$ (масс.). Массовая концентрация твёрдой фазы в осадке после слива осветлённой воды $\bar{x}_{\text{шл}} = 62\%$ (масс.). Плотность частиц примесей $\rho = 2000$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) $\rho_{\text{с0}} = 995$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,003 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 25$ °С.

3. Определить скорость центробежного фильтрования твёрдых загрязнений из сточной воды $\omega_{\text{ф}}$. Время фильтрования $\tau = 800$ с. Высота центрифуги $L = 2,1$ м. Средний радиус вращения центрифуги $r = 1,75$ м. Расстояние от оси вращения до поверхности осадка $r_2 = 1,35$ м, до стенок центрифуги $r_1 = 1,55$ м. Константа, характеризующая конструкцию центрифуги, $b = 1,3$. Окружная скорость вращения центрифуги $\omega_{\text{окр}} = 9$ м/с. Удельное объёмное сопротивление слоя осадка $r_v = 100 \cdot 10^{12}$ м/м³. Массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии $\bar{x}_n = 10\%$ (масс.). Массовая концентрация твёрдой фазы в осадке после слива осветлённой воды $\bar{x}_{\text{шл}} = 50\%$ (масс.). Плотность частиц примесей $\rho = 1900$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) $\rho_{\text{с0}} = 1000$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,005 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 20$ °С.

4. Определить скорость центробежного фильтрования твёрдых загрязнений из сточной воды $\omega_{\text{ф}}$. Время фильтрования $\tau = 1500$ с. Высота центрифуги $L = 1,2$ м. Средний радиус вращения центрифуги $r = 0,95$ м. Расстояние от оси вращения до поверхности осадка $r_2 = 0,55$ м, до стенок центрифуги $r_1 = 0,75$ м. Константа, характеризующая конструкцию центрифуги, $b = 1,3$. Окружная скорость вращения центрифуги $\omega_{\text{окр}} = 7$ м/с. Удельное объёмное сопротивление слоя осадка $r_v = 100 \cdot 10^{12}$ м/м³. Массовая концентрация твёрдой фазы в загрязнённой суспензии $\bar{x}_n = 23\%$ (масс.). Массовая концентрация твёрдой фазы в осадке после слива осветлённой воды $\bar{x}_{\text{шл}} = 57\%$ (масс.). Плотность частиц примесей $\rho = 2300$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) $\rho_{\text{с0}} = 998$ кг дс./м³ дс. Вязкость дисперсионной среды (чистой воды) $\mu_{\text{с}} = 1,003 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура в аппарате очистки $t = 10$ °С.

3.4. ПРОМЫВКА (ПРОДУВКА)

Теоретические основы промывки (подувки)

Промывка (продувка) – процесс движения жидкости (промывка) или газа (продувка) через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (зернистые или пористые слои) под действием разности давлений; при этом промывная среда (жидкость или газ) вытесняет из пор, отверстий или межзерновых каналов фильтровальных перегородок оставшуюся от какого-либо процесса очистки дисперсионную среду (как правило, жидкость) либо частицы дисперсионной фазы (вредных примесей) определённого размера и плотности.

В шламе различных суспензий обычно остаётся жидкость (дисперсионная среда) со стадии очистки, обуславливающая влажность осадка. Промывную жидкость заливают на поверхность шлама в виде слоя или подают в диспергированном (капельном) состоянии из разбрызгивающих устройств. Промывная жидкость под действием разности давлений (в данном случае, гравитационной) проходит сквозь поры шлама, вытесняет из них остатки жидкой дисперсионной среды и смешивается с ней.

Шлам со стадий очистки обычно является полидисперсным (частицы дисперсной фазы имеют различные размеры и плотность) или содержит остатки дисперсионной среды (жидкости или газа – лёгкие частицы). В определённую часть аппарата (в данном случае снизу) подаётся под давлением продувочный газ или промывная жидкость, которая проходит сквозь пустоты между тяжёлыми частицами шлама, захватывает лёгкие частицы шлама и начинает транспортировать их в направлении своего движения. В конце концов, все лёгкие частицы захватываются промывной (продувочной) средой, и происходит их гидротранспорт (массовый унос). В результате происходит разделение частиц шлама на лёгкую (верхнюю) и тяжёлую (нижнюю) фракции. При массовом уносе частицы имеют скорость ω , равную или превышающую скорость свободного витания $\omega_{св}$.

Во время начального периода промывки (продувки) промывная жидкость (продувочный газ) лишь вытесняет остатки дисперсной среды (либо частицы дисперсной фазы определённого размера или плотности) из пор и каналов слоя шлама (осадка). Во время следующего основного периода промывки (продувки) идёт процесс поглощения остатков дисперсионной среды (либо частиц дисперсной фазы определённого размера и плотности) промывной водой (продувочным газом) и удаления их со скоростью, равной или превышающей скорость уноса (свободного витания) ω_c .

При движении дисперсионной среды (жидкости или газа) через зернистый или пористый слой фильтровальной перегородки, когда поток полностью заполняет свободное пространство между элементами (частицами) слоя, можно считать, что жидкость одновременно обтекает отдельные элементы слоя и движется внутри каналов неправильной формы, образуемых пустотами и порами между элементами.

Так как при малом диаметре каналов неправильной формы в зернистом слое значение критерия Рейнольдса небольшое, то движение промывной среды сквозь зернистый слой практически всегда является ламинарным.

Процесс промывки (продувки), т.е. движение промывной (продувочной) среды сквозь слой шлама, является процессом фильтрования промывной (продувочной) среды при постоянном давлении и скорости, так как слой осадка (шлама) имеет постоянную высоту $h_{\text{шл}} = \text{const}$.

Остатки дисперсионной среды (либо частицы дисперсионной фазы) удаляются вместе с промывной средой со скоростью, соответствующей второй критической скорости (свободного витания) в случае псевдооживления $\omega_{\text{св}}$. Такое движение называется *гидро-, (пневно)транспортом* и используется не только для удаления частиц вместе с промывной (продувочной) средой, но и для их транспортирования по трубопроводам к другим аппаратам очистки, а также для перемещения загрязнённых неоднородных систем [1, с. 107].

Примеры расчёта процесса промывки (продувки)

Ситуация. На фильтре реализуется процесс промывки осадка после фильтрования сточной воды. Количество промывной воды – 34 кг. Фильтрованием очищалось 10 т сточной воды с начальной концентрацией загрязнений 9% (масс.). Масса полученного осадка – 1 т. Скорость промывки – $91,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Толщина слоя осадка – 50 мм. Коэффициент, учитывающий физико-химические свойства осадка и промывной воды, а также режим промывки, равен $0,52 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Считать, что фильтрат не содержит частиц загрязнений и что начало основного периода промывки соответствует началу всего процесса. После начала промывки концентрация остатков дисперсионной среды в осадке уменьшается на 98% (масс.). До начала промывки в промывной воде не содержится остатков дисперсионной среды.

Определить, сколько времени необходимо промывать осадок на фильтре от остатков дисперсионной среды, чтобы её концентрация в промывной воде достигла 0,07 кг/кг, и какого значения достигнет концентрация остатков дисперсионной среды в промывной воде через 1 ч после начала основного периода промывки.

Дано: $Q_{\text{пр}} = 34$ кг, $Q_{\text{шл}} = 10\,000$ кг, $\bar{x}_{\text{сл}} = 0,09 \frac{\text{кг П}}{\text{кг сл}}$, $Q_{\text{шл}} = 1000$ кг,

$$\omega = 91,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}, h_{\text{шл}} = 0,05 \text{ м}, K_{\text{пр}} = 0,52 \text{ м}^3/\text{м}^3, \bar{x}_{\text{с}} = 0 \frac{\text{кг П}}{\text{кг сл}},$$

$$\tau_1 = 0 \text{ с}, \eta = 98\%, \bar{C}_0 = 0 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг пр}}, \bar{C}_2 = 0,07 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг пр}}, \tau_3 = 3600 \text{ с}.$$

Найти: τ_2, C_3 .

Рекомендуемый ход решения. Время промывки осадка на фильтре от остатков дисперсионной среды, необходимое для достижения определённой концентрации её в промывной воде, определяется из формулы (3.60) [16]

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\lg C_1 - \lg C_2} = \frac{2,3h_{\text{шл}}}{K_{\text{пр}}\omega},$$

откуда

$$\tau_2 = \frac{2,3h_{\text{шл}}}{K_{\text{пр}}\omega} (\lg C_1 - \lg C_2) + \tau_1.$$

Концентрация частиц загрязнений в промывной воде сразу после начала процесса промывки определяется из уравнения материального баланса процесса промывки

$$Q_{\text{пр}}^* \bar{C}_1 + Q_{\text{шл}} \bar{C}_{\text{шл}1} = Q_{\text{пр}} \bar{C}_0 + Q_{\text{шл}} \bar{C}_{\text{шл}0} + Q_{\text{шл}},$$

откуда

$$\bar{C}_1 = \frac{Q_{\text{пр}} \bar{C}_0 + Q_{\text{шл}} \bar{C}_{\text{шл}0} - Q_{\text{шл}} \bar{C}_{\text{шл}1}}{Q_{\text{пр}}}.$$

Концентрация остатков дисперсионной среды в осадке после окончания процесса фильтрования (до начала промывки)

$$\bar{C}_{\text{шл}0} = 1 - \bar{x}_{\text{шл}}.$$

Концентрация твёрдых частиц во влажном осадке после окончания процесса фильтрования определяется из уравнения материального баланса процесса фильтрования:

$$Q_{\text{сл}} \bar{x}_{\text{сл}} = Q_{\text{шл}} \bar{x}_{\text{шл}} + Q_{\text{с}} \bar{x}_{\text{с}},$$

откуда

$$\bar{x}_{\text{шл}} = \frac{Q_{\text{сл}} \bar{x}_{\text{сл}} - Q_{\text{с}} \bar{x}_{\text{с}}}{Q_{\text{шл}}};$$

$$\bar{x}_{\text{сл}} = \frac{10\,000 \cdot 0,09 - Q_c \cdot 0}{1000} = 0,9 \frac{\text{кг пр}}{\text{кг шлл}}.$$

Тогда

$$\bar{C}_{\text{шлл}0} = 1 - 0,9 = 0,1 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг шлл}}.$$

Концентрация остатков дисперсионной среды в шламе сразу после начала процесса промывки

$$\bar{C}_{\text{шлл}1} = \bar{C}_{\text{шлл}0} - \frac{\eta C_{\text{шлл}0}}{100}, \quad \bar{C}_{\text{шлл}1} = 0,1 - \frac{98 \cdot 0,1}{100} = 0,002 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг шлл}}.$$

Тогда

$$\bar{C}_1 = \frac{34 \cdot 0 + 100 \cdot 0,1 - 100 \cdot 0,002}{34} = 0,29 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг пр}};$$

$$\tau_2 = \frac{2,3 \cdot 0,05}{0,52 \cdot 91,6 \cdot 10^{-6}} (\lg 0,29 - \lg 0,07) + 0 = 1490 \text{ с} = 24,2 \text{ мин.}$$

Концентрация остатков дисперсионной среды в промывной воде через определённое время (формула (3.59) [16])

$$\bar{C}_3 = \bar{C}_1 e^{-\frac{K_{\text{пр}} \omega \tau_3}{h_{\text{шлл}}}}, \quad C_3 = 0,29 e^{-\frac{0,52 \cdot 91,6 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{0,05}} = 0,0094 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг пр}}.$$

$$\text{Ответ: } \tau_2 = 1490 \text{ с}, \quad \bar{C}_3 = 0,0094 \frac{\text{кг дс}}{\text{кг пр}}.$$

Ситуация. По окончании процесса очистки сточной воды на зернистом фильтре осуществляется его промывка. При этом высота зернистого слоя – 1200 мм, удельная поверхность слоя – 1514 м²/м³, эквивалентный диаметр частиц зернистого слоя – 1,8 мм, коэффициент формы частиц слоя – 0,77 (округлые частицы), коэффициент кривизны каналов в слое – 1,1. Объёмный расход промывки жидкости – 90 м³/ч. Диаметр фильтра – 1,6 м². Плотность промывки жидкости – 998 кг/м³, вязкость промывной жидкости – 1,005·10⁻³ Па·с.

Определить гидравлическое сопротивление зернистого фильтровального слоя в процессе его промывки от остатков дисперсионной среды.

Дано: $h_{\text{шлл}} = 1,2 \text{ м}$, $a = 1514 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $d_s = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $\varphi = 0,77$, $\delta_k = 1,1$, $G_v = 0,025 \text{ м}^3/\text{с}$, $D = 1,6 \text{ м}^2$, $\rho_c = 998 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\mu_c = 1,005 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

Найти: ΔP .

Рекомендуемый ход решения. Гидравлическое сопротивление зернистого слоя в процессе промывки от остатков дисперсионной среды (формула (3.42) [16])

$$\Delta P = \lambda \frac{l_k}{d_{\text{эк}}} \frac{\rho_c \omega_c^2}{2}.$$

Общий коэффициент сопротивления движению промывной среды (формула (3.43) [16])

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34.$$

Критерий Рейнольдса для фильтровальной перегородки в виде зернистого слоя (формула (3.49) [16])

$$\text{Re} = \frac{2\Phi}{3(1-\varepsilon)} \frac{\omega d_3 \rho_c}{\mu_c}.$$

Фактор формы (формула (3.51) [16])

$$\Phi = \sqrt{\frac{1}{\varphi}}, \quad \Phi = \sqrt{\frac{1}{0,77}} = 1,139.$$

Фиктивная текущая скорость промывной среды в каналах слоя (удельная интенсивность промывки) (формула (3.46) [16])

$$\omega = \frac{G_v}{S}.$$

Площадь промывки

$$S = \frac{\pi D^2}{4}, \quad S = \frac{3,14 \cdot 1,6^2}{4} = 2,0096 \text{ м}^2.$$

Тогда

$$\omega = \frac{0,025}{2,0096} = 0,0124 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Порозность зернистого слоя определяется из формулы (3.48) [16]

$$d_{\text{эк}} = \frac{4\varepsilon}{a} = \frac{2\Phi\varepsilon}{3(1-\varepsilon)} d_3,$$

откуда

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Phi d_3 a}{6}, \quad \varepsilon = 1 - \frac{1,139 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 1514}{6} = 0,41.$$

Тогда

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 1,299}{3(1 - 0,41)} \frac{0,0124 \cdot 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot 998}{1,005 \cdot 10^{-3}} = 32,5;$$
$$\lambda = \frac{133}{32,5} + 2,34 = 6,432.$$

Длина каналов в зернистом слое (формула (3.47) [16])

$$l_{\kappa} = \delta_{\kappa} h_{\text{шл}}, \quad l_{\kappa} = 1,1 \cdot 1,2 = 1,32 \text{ м.}$$

Эквивалентный диаметр каналов в зернистом слое (формула (3.48) [16])

$$d_{\text{эк}} = \frac{4\varepsilon}{a}, \quad d_{\text{эк}} = \frac{4 \cdot 0,41}{1514} = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Действительная скорость промывной жидкости в каналах слоя (формула (3.45) [16])

$$\omega_c = \frac{\omega}{\varepsilon}, \quad \omega_c = \frac{0,0124}{0,41} = 0,0302 \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Тогда

$$\Delta P = 6,432 \frac{1,32}{1,08 \cdot 10^{-3}} \frac{998 \cdot 0,0302^2}{2} = 3577 \text{ Па.}$$

Ответ: $\Delta P = 3577 \text{ Па.}$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить скорость промывки водой ω_n зернистого осадка на фильтре, состоящем из $n = 14$ рам размерами $a \times b = 0,8 \times 0,8$ м, если в лабораторных условиях были получены следующие данные по промывке: время, с: $\tau_1 = 140$, $\tau_2 = 900$; объём грязной промывной воды, м^3 : $V_{n1} = 0,037$, $V_{n2} = 0,091$. Всего в лабораторных условиях получено $V_n = 0,475 \text{ м}^3$ грязной промывной воды. Промывка происходит при постоянном давлении $\Delta P = \text{const}$.

2. Определить скорость промывки водой ω_n зернистого осадка на фильтре, состоящем из $n = 20$ рам размерами $a \times b = 0,7 \times 0,7$ м, если в лабораторных условиях были получены следующие данные по промывке: время, с: $\tau_1 = 135$, $\tau_2 = 910$; объём грязной промывной воды, м^3 : $V_{n1} = 0,033$, $V_{n2} = 0,087$. Всего в лабораторных условиях получено $V_n = 0,45 \text{ м}^3$ грязной промывной воды. Промывка происходит при постоянном давлении $\Delta P = \text{const}$.

3. Определить время первого периода промывки τ_1 и значение, которого достигнет концентрация остатков дисперсионной среды в промывной воде через $\tau_3 = 4010$ с после начала процесса фильтрования (первого периода промывки). Время основного периода промывки осадка на фильтре от остатков дисперсионной среды $\tau_2 = 2750$ с. Концентрация остатков дисперсионной среды в промывной воде через время τ_2 достигает $\bar{C}_2 = 0,06$ кг д.с./кг пр. Количество промывной воды $Q_{пр} = 30$ кг. Фильтрованием очищалось $Q_{сл} = 10\,500$ кг сточной воды с начальной концентрацией загрязнений $\bar{x}_{сл} = 9,2\%$ (масс.). Масса полученного осадка $Q_{осл} = 1100$ кг. Скорость промывки $\omega = 91 \cdot 10^{-6}$ м³/(м²·с). Толщина слоя осадка $h_{осл} = 0,18e_{осл}$ м. Коэффициент, учитывающий физико-химические свойства осадка и промывной воды, а также режим промывки, равен $K_{пр} = 0,53$ м³/м³. Фильтрат содержит $\bar{x}_c = 0,82\%$ (масс.) частиц примесей. После начала промывки концентрация остатков дисперсионной среды в осадке уменьшается на $\eta = 95\%$ (масс.). До начала промывки промывная вода содержит некоторое количество дисперсионной среды, равное $\bar{C}_0 = 0,1\%$ (масс.). Плотность частиц примесей $\rho = 1700$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистой воды) $\rho_{с0} = 1000$ кг дс./м³ дс. Температура в аппарате очистки $t = 39$ °С.

4. Определить гидравлическое сопротивление ΔP зернистого фильтровального слоя в процессе его промывки от остатков дисперсионной среды. Высота зернистого слоя $h_{осл} = 1,3$ м. Удельная поверхность слоя $a = 1554$ м²/м³. Коэффициент кривизны каналов в слое $\sigma_k = 1,5$. Объёмный расход промывной жидкости $G_v = 0,035$ м³/с. Диаметр фильтра $D = 1,9$ м². Масса одной частицы зернистого слоя $m = 2,1 \cdot 10^{-5}$ кг. Плотность частиц зернистого слоя $\rho = 2700$ кг п./м³ п. Коэффициент формы округлых частиц слоя $\phi = 0,77$. Плотность промывной жидкости $\rho_{с0} = 1000$ кг/м³. Вязкость промывной жидкости $\mu_c = 1,001 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Температура промывной жидкости $t = 22$ °С.

3.5. ГЛУБИННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Теоретические основы глубинной фильтрации

Глубинная фильтрация (зернистое фильтрование) – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсионной средой) при их движении через различного вида зернистые, подвижные, неподвижные и псевдооживленные фильтровальные слои под действием малой разницы давлений, создаваемой насосами или гравитацией, при этом зернистый слой задерживает твёрдые частицы или капли дисперсионной фазы и пропускает дисперсионную среду.

Разделение неоднородных систем, состоящих из дисперсионной среды (жидкости или газа) и взвешенных в ней твёрдых частиц или капель, проводят в фильтре с зернистой загрузкой.

Загрязнённую систему подают внутрь фильтра. Под действием перепада давлений дисперсионная среда проходит сквозь зернистый слой, а частицы дисперсной фазы задерживаются зернистым слоем. В процессе фильтрования происходит закупоривание каналов зернистого слоя мелкими частицами дисперсной фазы и образование слоя осадка увеличивающейся толщины из крупных частиц дисперсной фазы. В результате реализации процесса неоднородная система разделяется на осветлённую дисперсионную среду (фильтрат) и шлам (влажный осадок и закупоренный примесями зернистый слой).

Механизм и кинетика процесса глубинной фильтрации (зернистого фильтрования) аналогичны процессам фильтрования с образованием осадка, фильтрования с забивкой пор и промывкой (продувкой) через зернистый слой. При этом процесс зернистого фильтрования имеет свои особенности.

Механизмы извлечения частиц дисперсной фазы из неоднородной системы сводятся к следующим действиям:

- процеживание (механическое фильтрование);
- гравитационное осаждение;
- инерционное осаждение;
- химическая адсорбция (хемоадсорбция);
- физическая адсорбция;
- адгезия (смачивание);
- коагуляционное осаждение;
- биологическое выращивание.

В общем случае эти механизмы могут действовать совместно, и процесс зернистого фильтрования будет состоять из следующих стадий:

- перенос частиц дисперсной фазы на поверхность веществ, образующих зернистый слой;
- прикрепление частиц дисперсной фазы к поверхности зёрен;
- отрыв частиц дисперсной фазы от поверхности зёрен.

Прилипшие частицы примесей постоянно испытывают влияние движущегося потока дисперсионной среды, который в результате трения срывает их с поверхности зёрен. При равенстве числа частиц примесей, поступающих в единицу времени на поверхность зернистого слоя и покидающих её, наступает насыщение поверхности зёрен, и она перестаёт очищать загрязнённые системы.

При глубинной фильтрации (зернистом фильтровании) эмульсий имеет значение первоначальный характер поверхности зёрен загрузки.

При гидрофобной поверхности зёрен прилипание частиц сильнее, чем при гидрофильной, так как на поверхности зёрен гидрофильных материалов имеется гидратная оболочка, и прилипание капель примесей происходит только там, где эта оболочка нарушена.

Пример расчёта процесса глубинной фильтрации

Ситуация. Для реализации процесса очистки сточной воды на городских очистных сооружениях необходимо подобрать зернистый фильтр. Заданная производительность фильтра – 15,2 м³/ч. Расчётная продолжительность работы фильтра в течение суток – 24 ч. Интенсивность промывки – 12,5 л/(м·с²). Продолжительность промывки – 0,1 ч. Количество промывок фильтра за сутки – 1. Время простоя фильтра в связи с промывкой – 0,33 ч. Эквивалентный диаметр частиц песка – 0,74 мм. Параметр $\psi = 0,063$. Расчётная скорость фильтрования при нормальном режиме эксплуатации – 6 м/ч. Параметр, учитывающий свойства содержащихся в воде взвешенных веществ, – 17. Параметр, учитывающий степень неоднородности загрузки, – 1,7. Продолжительность работы фильтрующей загрузки между двумя промывками (время, в течение которого достигается предельная потеря напора) – 12 ч. Величины, характеризующие физико-химические свойства фильтруемой воды, взвеси и её концентрацию: $K_0 = 0,23$, $X_0 = 3,5\%$. Предельно допустимая величина потерь напора в фильтре – 250 см вод. ст. Поддерживающие слои имеют общую высоту – 0,5 м.

Определить размеры зернистого фильтра, пригодного для реализации процесса глубинной фильтрации с указанными параметрами.

Дано: $Q_p = 15,2$ м³/ч, $T = 24$ ч, $\omega = 12,5$ л/(м·с²), $t_1 = 0,1$ ч, $n = 1$, $t_2 = 0,33$ ч, $d_3 = 0,74$ мм, $\psi = 0,063$, $v_{p,n} = 6$ м/ч, $\gamma_i = 17$, $\varphi = 1,7$, $t_n = 12$ ч, $K_0 = 0,23$, $X_0 = 3,5\%$, $H_{\text{пред}} = 250$ см вод. ст., $H_{\text{п.с}} = 0,5$ м.

Найти: a , b , $H_{\text{вн.ф}}$.

Рекомендуемый ход решения. Высота фильтрующего слоя (расстояние от поверхности загрузки фильтра до слоя, в котором концентрация взвеси снижена до заданной величины) определяется по формуле (75) [19, с. 136]

$$H_{\text{ф}} = \frac{H_{\text{пред}} d_3^2}{\psi v_{p,n}} - \gamma_i \varphi t_n \sqrt{d_3},$$

$$H_{\text{ф}} = \frac{250 \cdot 0,74^2}{0,063 \cdot 6} - 17 \cdot 1,7 \cdot 12 \cdot \sqrt{0,74} = 63,84 \text{ см} \approx 0,7 \text{ м.}$$

Принимаем высоту фильтрующего слоя [19, с. 132, табл. 37], равной $H_{\text{ф}} = 0,7$ м.

Время, в течение которого загрузка способна осветлять воду до заданной степени (время защитного действия слоя) (формула (76) [19, с. 136])

$$t_3 = \frac{d_3}{K_0 v_{p,n}} \left(\frac{H_\phi \cdot 10^2}{v_{p,n}^{0,7} d_3^{1,7}} - X_0 \right), \quad t_3 = \frac{0,74}{0,23 \cdot 6} \left(\frac{0,7 \cdot 10^2}{6^{0,7} \cdot 0,74^{1,7}} - 3,5 \right) = 15,99 \text{ ч.}$$

Для обеспечения оптимального режима работы фильтра отношение t_3/t_n должно составлять 1,2...1,5. В нашем случае оно равно

$$1,2 < \frac{t_3}{t_n} = 1,333 < 1,5.$$

Таким образом, загрузка фильтра подобрана правильно. Суточная производительность зернистого фильтра

$$Q_{\text{сут}} = Q_{\text{час}} \cdot 24 = 364,8 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Суммарная площадь горизонтального сечения фильтра (по формуле (77) [19, с. 136])

$$F = \frac{Q_{\text{сут}}}{T v_{p,n} - 3,6 n \omega t_1 - n t_2 v_{p,n}},$$

$$F = \frac{364,8}{24 \cdot 6 - 3,6 \cdot 1 \cdot 12,5 \cdot 0,1 - 1 \cdot 0,33 \cdot 6} = 2,65 \text{ м}^2.$$

Количество фильтров (по формуле (78) [19, с. 138])

$$N = 0,5 \sqrt{F}, \quad N = 0,5 \sqrt{2,65} = 0,814.$$

Принимаем $N = 1$ фильтр. Площадь горизонтального сечения одного фильтра (согласно рекомендациям [19, с. 138])

$$F_1 = \frac{F}{N}, \quad F_1 = \frac{2,65}{1} = 2,65 \text{ м}^2.$$

Размер фильтра в плане

$$a = \sqrt{F_1}, \quad a = \sqrt{2,65} = 1,63 \text{ м,}$$

$$b = a = 1,63 \text{ м.}$$

Скорость фильтрования при форсированном режиме не считаем, так как принят всего один фильтр. Общая высота внутреннего рабочего пространства фильтра составит (с учетом рекомендуемого однометрового слоя сточной воды над загрузкой и 0,5 м «запаса» [19])

$$H_{\text{вн.ф}} = H_{\text{ф}} + H_{\text{пс}} + 1 + 0,5(3,56), \quad H_{\text{вн.ф}} = 0,7 + 0,5 + 1 + 0,5 = 2,7 \text{ м.}$$

$$\text{Ответ: } a = 1,63 \text{ м, } b = 1,63 \text{ м, } H_{\text{вн.ф}} = 2,7 \text{ м.}$$

Задания для самостоятельной работы

1. Для реализации процесса очистки сточной воды на городских очистных сооружениях необходимо подобрать зернистый фильтр. Заданная производительность фильтра $Q_p = 20 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расчётная продолжительность работы фильтра в течение суток $T = 36 \text{ ч}$. Интенсивность промывки $\omega = 15 \text{ л}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Продолжительность промывки $t_1 = 0,15 \text{ ч}$. Количество промывок фильтра за сутки $n = 2$. Время простоя фильтра в связи с промывкой $t_2 = 0,43 \text{ ч}$. Эквивалентный диаметр частиц песка $d_s = 0,84 \text{ мм}$. Параметр $\psi = 0,063$. Расчётная скорость фильтрования при нормальном режиме эксплуатации $v_{p,n} = 8 \text{ м}/\text{ч}$. Параметр, учитывающий свойства содержащихся в воде взвешенных веществ, $\gamma_i = 17$. Параметр, учитывающий степень неоднородности загрузки, $\phi = 1,7$. Продолжительность работы фильтрующей загрузки между двумя промывками (время, в течение которого достигается предельная потеря напора) $t_n = 18 \text{ ч}$. Величины, характеризующие физико-химические свойства фильтруемой воды, взвеси и её концентрацию: $K_0 = 0,23$, $X_0 = 3,5\%$. Предельно допустимая величина потерь напора в фильтре $H_{\text{пред}} = 250 \text{ см вод. ст.}$ Поддерживающие слои имеют общую высоту $H_{\text{п.с}} = 0,5 \text{ м}$. Определить размеры зернистого фильтра a , b , $H_{\text{вн.ф}}$, пригодного для реализации процесса глубинной фильтрации с указанными параметрами.

2. Для реализации процесса очистки сточной воды на городских очистных сооружениях необходимо подобрать зернистый фильтр. Заданная производительность фильтра $Q_p = 30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расчётная продолжительность работы фильтра в течение суток $T = 30 \text{ ч}$. Интенсивность промывки $\omega = 11 \text{ л}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Продолжительность промывки $t_1 = 0,12 \text{ ч}$. Количество промывок фильтра за сутки $n = 3$. Время простоя фильтра в связи с промывкой $t_2 = 0,3 \text{ ч}$. Эквивалентный диаметр частиц песка $d_s = 0,8 \text{ мм}$. Параметр $\psi = 0,063$. Расчётная скорость фильтрования при нормальном режиме эксплуатации $v_{p,n} = 7 \text{ м}/\text{ч}$. Параметр, учитывающий свойства содержащихся в воде взвешенных веществ, $\gamma_i = 17$. Параметр, учитывающий степень неоднородности загрузки, $\phi = 1,7$. Продолжительность работы фильтрующей загрузки между двумя промывками (время, в течение которого достигается предельная потеря напора) $t_n = 15 \text{ ч}$. Величины, характеризующие физико-химические свойства фильтруемой воды, взвеси и её концентрацию: $K_0 = 0,23$, $X_0 = 3,5\%$. Предельно допустимая величина потерь напора в фильтре $H_{\text{пред}} = 250 \text{ см вод. ст.}$ Поддерживающие слои имеют общую высоту $H_{\text{п.с}} = 0,5 \text{ м}$. Определить разме-

ры зернистого фильтра $a, b, H_{\text{вн.ф}}$, пригодного для реализации процесса глубинной фильтрации с указанными параметрами.

3. Для реализации процесса очистки сточной воды на городских очистных сооружениях необходимо подобрать зернистый фильтр. Заданная производительность фильтра $Q_p = 18 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расчётная продолжительность работы фильтра в течение суток $T = 28 \text{ ч}$. Интенсивность промывки $\omega = 10 \text{ л}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Продолжительность промывки $t_1 = 0,12 \text{ ч}$. Количество промывок фильтра за сутки $n = 1$. Время простоя фильтра в связи с промывкой $t_2 = 0,32 \text{ ч}$. Эквивалентный диаметр частиц песка $d_3 = 0,64 \text{ мм}$. Параметр $\psi = 0,063$. Расчётная скорость фильтрования при нормальном режиме эксплуатации $v_{p,n} = 6,5 \text{ м}/\text{ч}$. Параметр, учитывающий свойства содержащихся в воде взвешенных веществ, $\gamma_i = 17$. Параметр, учитывающий степень неоднородности загрузки, $\phi = 1,7$. Продолжительность работы фильтрующей загрузки между двумя промывками (время, в течение которого достигается предельная потеря напора) $t_n = 14 \text{ ч}$. Величины, характеризующие физико-химические свойства фильтруемой воды, взвеси и её концентрацию: $K_0 = 0,23, X_0 = 3,5\%$. Предельно допустимая величина потерь напора в фильтре $H_{\text{пред}} = 250 \text{ см вод. ст.}$ Поддерживающие слои имеют общую высоту $H_{\text{п.с}} = 0,5 \text{ м}$. Определить размеры зернистого фильтра $a, b, H_{\text{вн.ф}}$, пригодного для реализации процесса глубинной фильтрации с указанными параметрами.

4. Для реализации процесса очистки сточной воды на городских очистных сооружениях необходимо подобрать зернистый фильтр. Заданная производительность фильтра $Q_p = 12 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расчётная продолжительность работы фильтра в течение суток $T = 18 \text{ ч}$. Интенсивность промывки $\omega = 18 \text{ л}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$. Продолжительность промывки $t_1 = 0,2 \text{ ч}$. Количество промывок фильтра за сутки $n = 1$. Время простоя фильтра в связи с промывкой $t_2 = 0,3 \text{ ч}$. Эквивалентный диаметр частиц песка $d_3 = 0,6 \text{ мм}$. Параметр $\psi = 0,063$. Расчётная скорость фильтрования при нормальном режиме эксплуатации $v_{p,n} = 6,8 \text{ м}/\text{ч}$. Параметр, учитывающий свойства содержащихся в воде взвешенных веществ, $\gamma_i = 17$. Параметр, учитывающий степень неоднородности загрузки, $\phi = 1,7$. Продолжительность работы фильтрующей загрузки между двумя промывками (время, в течение которого достигается предельная потеря напора) $t_n = 9 \text{ ч}$. Величины, характеризующие физико-химические свойства фильтруемой воды, взвеси и её концентрацию: $K_0 = 0,23, X_0 = 3,5\%$. Предельно допустимая величина потерь напора в фильтре $H_{\text{пред}} = 250 \text{ см вод. ст.}$ Поддерживающие слои имеют общую высоту $H_{\text{п.с}} = 0,5 \text{ м}$. Определить размеры зернистого фильтра $a, b, H_{\text{вн.ф}}$, пригодного для реализации процесса глубинной фильтрации с указанными параметрами.

3.6. ПОВЕРХНОСТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ (ПРОЦЕЖИВАНИЕ)

Теоретические основы поверхностной фильтрации (процеживания)

Процеживание (поверхностная фильтрация, просеивание, брызгоулавливание) – процесс разделения неоднородных систем (с жидкой или газовой дисперсионной средой) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (решётки с отверстиями размерами 16...19 мм и сита с отверстиями размерами 0,5...1 мм, реже 60...100 мкм) под действием разности давлений (до и после перегородки), создаваемой насосами или силой гравитации; при этом перегородка задерживает крупные частицы или капли дисперсной фазы и пропускает дисперсионную среду вместе с мелкими твёрдыми частицами (или каплями).

В процессе поверхностной фильтрации сточная вода поступает на решётку. Мелкие частицы отбросов вместе с потоком сточной воды проходят через отверстия решётки и далее транспортируются на последующие очистные сооружения. Крупные частицы отбросов задерживаются на решётке, а затем с помощью, например, опускающихся цепных граблей счищаются с решётки.

Пример расчёта процесса поверхностной фильтрации (процеживания)

Ситуация. Проект реконструкции городских очистных сооружений предполагает установку решётки для очистки сточной воды от отбросов. Угол наклона решётки к горизонту – 60° , толщина стержней решётки – 0,008 м, ширина прозоров решётки – 0,016 м, ширина решётки – 1580 мм. Потери напора в решётке – 10 см. Коэффициент формы стержней решётки – 2,42. Коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора в решётке вследствие засорения её отбросами – 3. Суммарная площадь прозоров решётки – $1,47 \cdot 10^3 \text{ м}^2$. Коэффициент, учитывающий стеснение потока механизированными граблями для выгрузки отбросов, – 1,05. Количество отбросов, производимых одним человеком в городе, – 8 л, приведённое население по взвешенным веществам – 312 400 чел. Плотность отбросов – 1750 кг/м^3 . Расчётный максимальный расход сточной воды на 1 т отбросов – $40 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{т})$.

Определить величину расчётного наполнения сточной водой канала перед решёткой для процеживания.

Дано: $\varphi = 60^\circ$, $s = 0,008 \text{ м}$, $b = 0,016 \text{ м}$, $B_p = 1,58 \text{ м}$, $h_p = 0,1 \text{ м}$, $\beta = 2,42$, $K = 3$, $F = 1,47 \cdot 10^3 \text{ м}^2$, $K_1 = 1,05$, $a = 8 \text{ л}$, $N_{\text{пр}} = 312 \text{ 400 чел.}$, $\rho = 1750 \text{ кг/м}^3$, $Q'_{\text{сут max}} = 40 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot \text{т}$.

Найти: h_{\max} .

Рекомендуемый ход решения. Расчётное наполнение сточной водой канала перед решёткой для процеживания (формула (3.67) [16])

$$h_{\max} = \frac{q_{\max} K_1}{b \vartheta_c n N}.$$

Максимальный секундный расход сточной воды

$$q_{\max} = \frac{Q_{\text{сут max}}}{24 \cdot 3600}.$$

Максимальный суточный расход сточной воды, подаваемой к решётке [13, с. 48]

$$Q_{\text{сут max}} = Q'_{\text{сут max}} P.$$

Масса отбросов, снимаемых с решётки за сутки [13, с. 47]

$$P = \frac{W \rho}{1000}.$$

Суточный расход отбросов, снимаемых с решётки [13, с. 47]:

$$W = \frac{aN_{\text{пр}}}{365}, \quad W = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot 312 \cdot 400}{365} = 6,85 \text{ м}^3.$$

Тогда

$$P = \frac{6,85 \cdot 1750}{1000} = 12 \text{ т};$$

$$Q_{\text{сут max}} = 40 \cdot 12 = 480 \text{ м}^3/\text{сут};$$

$$q_{\max} = \frac{480}{24 \cdot 3600} = 0,0055 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Скорость движения сточной воды в прозорах решётки определяется из формулы 3.70 [16], [13, с. 46]

$$h_p = \xi \frac{\vartheta_c^2}{2g} K,$$

откуда

$$\vartheta_c = \sqrt{\frac{2gh_p}{\xi K}}.$$

Коэффициент местного сопротивления решётки (формула (3.71) [16], [13, с. 46])

$$\xi = \beta \left(\frac{s}{b} \right)^{4/3} \sin \varphi, \quad \xi = 2,42 \left(\frac{0,008}{0,016} \right)^{4/3} \sin 60^\circ = 0,83.$$

Тогда

$$v_c = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 0,1}{0,83 \cdot 3}} = 0,886 \text{ м/с.}$$

Число прозоров в решётке [13, с. 45]

$$n = \frac{B_p + S}{b + S}, \quad n = \frac{1,58 + 0,008}{0,016 + 0,008} = 66,16 \approx 66.$$

Число решёток определяется из формулы (3.72) [16], [13, с. 49]

$$v_c = \frac{q_{\max}}{NF},$$

откуда

$$N = \frac{q_{\max}}{v_c F}, \quad N = \frac{0,0055}{0,886 \cdot 1,47 \cdot 10^{-3}} = 4,22 \approx 4.$$

Тогда

$$h_{\max} = \frac{0,0055 \cdot 1,05}{0,016 \cdot 0,886 \cdot 66 \cdot 4} = 0,0015 \text{ м.}$$

Ответ: $h_{\max} = 0,0015 \text{ м.}$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить величину расчётного наполнения h_{\max} сточной воды канала перед решёткой для процеживания. Угол наклона решётки к горизонту $\varphi = 65^\circ$. Толщина стержней решётки $s = 0,008 \text{ м}$. Ширина прозоров решётки $b = 0,016 \text{ м}$. Ширина решётки $B_p = 1,8 \text{ м}$. Потери напора в решётке $h_p = 0,2 \text{ м}$. Коэффициент формы стержней решётки $\beta = 2,42$. Коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора в решётке вследствие засорения её отбросами, $K = 3$. Суммарная площадь прозоров решётки $F = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Коэффициент, учитывающий стеснение потока механизированными граблями для выгрузки отбросов, $K_1 = 1,05$. Количество отбросов, производимых одним человеком в городе, $a = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{сут}$. Приведённое население $N_{\text{пр}} = 340 \text{ 000}$ чел. Плотность отбросов $\rho = 1850 \text{ кг/м}^3$. Расчётный максимальный расход сточной воды на 1 т отбросов составляет $Q'_{\text{сут max}} = 50 \text{ м}^3/(\text{сут} \cdot \text{т})$.

2. Определить величину расчётного наполнения h_{\max} сточной водой канала перед решёткой для процеживания. Угол наклона решётки к горизонту $\varphi = 50^\circ$. Толщина стержней решётки $s = 0,008$ м. Ширина прозоров решётки $b = 0,016$ м. Ширина решётки $B_p = 1,5$ м. Потери напора в решётке $h_p = 0,15$ м. Коэффициент формы стержней решётки $\beta = 2,42$. Коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора в решётке вследствие засорения её отбросами, $K = 2$. Суммарная площадь прозоров решётки $F = 1 \cdot 10^{-3}$ м². Коэффициент, учитывающий стеснение потока механизированными граблями для выгрузки отбросов, $K_1 = 1,05$. Количество отбросов, производимых одним человеком в городе, $a = 6 \cdot 10^{-3}$ м³/сут. Приведённое население $N_{\text{пр}} = 32\,400$ чел. Плотность отбросов $\rho = 1800$ кг/м³. Расчётный максимальный расход сточной воды на 1 т отбросов составляет $Q'_{\text{сут max}} = 45$ м³/(сут·т).

3. Определить величину расчётного наполнения h_{\max} сточной водой канала перед решёткой для процеживания. Угол наклона решётки к горизонту $\varphi = 50^\circ$. Толщина стержней решётки $s = 0,0081$ м. Ширина прозоров решётки $b = 0,026$ м. Ширина решётки $B_p = 1,68$ м. Потери напора в решётке $h_p = 0,12$ м. Коэффициент формы стержней решётки $\beta = 2,42$. Коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора в решётке вследствие засорения её отбросами, $K = 3,5$. Суммарная площадь прозоров решётки $F = 1,57 \cdot 10^{-3}$ м². Коэффициент, учитывающий стеснение потока механизированными граблями для выгрузки отбросов, $K_1 = 1,07$. Количество отбросов, производимых одним человеком в городе, $a = 9 \cdot 10^3$ мл. Приведённое население $N_{\text{пр}} = 324\,000$ чел. Плотность отбросов $\rho = 1800$ кг/м³. Расчётный максимальный расход сточной воды на 1 т отбросов составляет $Q'_{\text{сут max}} = 4,63 \cdot 10^{-7}$ м³/(с·кг).

4. Определить величину расчётного наполнения h_{\max} сточной водой канала перед решёткой для процеживания. Угол наклона решётки к горизонту $\varphi = 70^\circ$. Толщина стержней решётки $s = 0,007$ м. Ширина прозоров решётки $b = 0,02$ м. Ширина решётки $B_p = 1,6$ м. Потери напора в решётке $h_p = 0,2$ м. Коэффициент формы стержней решётки $\beta = 2,42$. Коэффициент, учитывающий увеличение потерь напора в решётке вследствие засорения её отбросами, $K = 3,5$. Суммарная площадь прозоров решётки $F = 1,7 \cdot 10^{-3}$ м². Коэффициент, учитывающий стеснение потока механизированными граблями для выгрузки отбросов, $K_1 = 1,07$. Количество отбросов, производимых одним человеком в городе, $a = 10 \cdot 10^3$ мл. Приведённое население $N_{\text{пр}} = 450\,000$ чел. Плотность отбросов $\rho = 1800$ кг/м³. Расчётный максимальный расход сточной воды на 1 т отбросов составляет $Q'_{\text{сут max}} = 5 \cdot 10^{-7}$ м³/(с·кг).

3.7. ГРОХОЧЕНИЕ

Теоретические основы грохочения

Грохочение (сортировка, просеивание) – процесс разделения неоднородных систем (с твёрдой дисперсионной средой) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (решётки, сетки, сита) под действием разности давлений (до и после перегородки), создаваемой силой гравитации, силой трения, инерционными силами; при этом перегородка задерживает крупные твёрдые частицы дисперсной фазы и пропускает мелкие твёрдые частицы дисперсионной среды.

Неоднородную систему подают на сито. Сито приводится в движение в определённых направлениях и с определённой периодичностью для осуществления движения твёрдых частиц неоднородной системы и поверхности сита относительно друг друга. В результате такого движения твёрдые частицы дисперсионной среды, размер которых равен или меньше размера отверстия в сите, проходят через него (просев), а более крупные твёрдые частицы дисперсной фазы (примеси) задерживаются на сите (отсев).

Очистка твёрдых неоднородных систем грохочением возможна в том случае, если твёрдые частицы данной неоднородной системы движутся с некоторой скоростью по фильтровальной перегородке.

Пример расчёта процесса грохочения

Ситуация. На мусоросортировочном заводе проводится разделение твёрдых отходов по фракциям путём грохочения. Начальное содержание крупных частиц в исходной неоднородной системе – 50% (масс.). Масса исходной неоднородной системы – 58 кг. Насыпная плотность частиц неоднородной системы – 1200 кг/м^3 . Мелкие частицы имеют средний эквивалентный диаметр – 50 мм. Диаметр отверстий в сите – 50 мм. Длина сита – 2,5 м. Ширины сита – 1 м. Сито установлено горизонтально.

Определить содержание мелких частиц дисперсионной среды, оставшихся в шламе среды крупных частиц дисперсной фазы после окончания процесса грохочения.

Дано: $\bar{x} = 50\%$ (масс.), $Q = 58 \text{ кг}$, $\rho_n = 1200 \text{ кг/м}^3$, $d_s = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $d_{\text{зк}} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $L = 2,5 \text{ м}$, $B = 1 \text{ м}$, $\delta = 0$.

Найти: \bar{v} .

Рекомендуемый ход решения. Содержание мелких частиц дисперсионной среды, оставшихся в шламе среди крупных частиц дисперсной фазы,

$$\bar{v} = 100 - \bar{x}_{\text{шл}}.$$

Содержание крупных частиц дисперсной фазы в шламе определяется из формулы 3.84 [16]

$$\eta = \frac{10\,000(\bar{x}_{\text{шл}} - \bar{x}_{\text{н}})}{\bar{x}_{\text{шл}}(100 - \bar{x}_{\text{н}})},$$

откуда

$$\bar{x}_{\text{шл}} = \frac{10\,000\bar{x}_{\text{н}}}{10\,000 - \eta(100 - \bar{x}_{\text{н}})}.$$

Эффективность грохочения

$$\eta = \frac{2(\bar{G}\tau - Q)}{\bar{G}\tau(100 - \bar{x}_{\text{н}})} 10\,000\%.$$

Массовая производительность грохота

$$\bar{G} = BLc_{\text{н}}\omega_{\Gamma}.$$

Скорость грохочения (фактическая удельная объёмная производительность грохота)

$$\omega_{\Gamma} = \frac{\omega - 0,16}{54}.$$

Относительная скорость движения частиц неоднородной системы по горизонтальному сити (формула (3.78) [16])

$$\omega = (d_{\text{эк}} - r_{\text{э}}) \sqrt{\frac{g}{2r_{\text{э}}}}.$$

Эквивалентный радиус мелких частиц

$$r_{\text{э}} = \frac{d_{\text{э}}}{2}, \quad r_{\text{э}} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Тогда

$$\omega = (50 \cdot 10^{-3} - 25 \cdot 10^{-3}) \sqrt{\frac{9,81}{2 \cdot 25 \cdot 10^{-3}}} = 0,35 \text{ м/с};$$

$$\omega = \frac{0,35 - 0,16}{54} = 3,52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}};$$

$$\bar{G} = 2,51 \cdot 1 \cdot 1200 \cdot 3,52 \cdot 10^{-3} = 10,56 \text{ кг/с}.$$

Среднее время пребывания частиц на сите

$$\tau = \frac{L}{\omega}, \quad \tau = \frac{2,5}{0,35} = 7,14 \text{ с.}$$

Тогда

$$\eta = \frac{2(10,56 \cdot 7,14 - 58)}{10,56 \cdot 7,14 \cdot (100 - 50)} 10\,000\% = 92,3\% ;$$

$$\bar{x}_{\text{шп}} = \frac{10\,000 \cdot 50}{10\,000 - 92,3(100 - 50)} = 92,8\% ;$$

$$\bar{v} = 100 - 92,8 = 7,2\% \text{ (масс).}$$

Ответ: $\bar{v} = 7,2\%$ (масс).

Ситуация. На грохоте производится выделение полезных для народного хозяйства твёрдых компонентов нижнего класса. Насыпная плотность твёрдых отходов перед грохочением – 1200 кг/м^3 , массовая производительность – 10 кг/с , ширина сита – 2 м , длина сита – 6 м , доля нижнего класса ($d < d_i$) в исходном материале – 20% . Масса материала на сите – 280 кг .

Определить содержание нижнего класса частиц диаметром, меньшим диаметра отверстия сита твёрдых частиц в надрешётном продукте после грохочения.

Дано: $\rho_n = 1200 \text{ кг/м}^3$, $G = 10 \text{ кг/с}$, $B = 2 \text{ м}$, $L = 6 \text{ м}$, $\alpha = 20\%$, $M = 280 \text{ кг}$.

Найти: V .

Рекомендуемый ход решения. Содержание нижнего класса частиц в надрешётном продукте после грохочения

$$V = \frac{\alpha(100 - \eta)}{10\,000 - \eta\alpha} 100\% .$$

Эффективность грохочения

$$\eta = \frac{2(G\tau - M)}{G\tau \frac{\alpha}{100\%}} 100\% .$$

Среднее время пребывания частицы материала на сите

$$\tau = \frac{L}{V'} .$$

Оптимальная скорость движения материала по сити

$$V' = 0,16 + 54q_r .$$

Фактическая удельная объёмная производительность грохота

$$q_r = \frac{G}{BLq_n}, \quad q_r = \frac{10}{2 \cdot 6 \cdot 1200} = 0,69 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Тогда

$$V' = 0,16 + 54 \cdot 0,69 \cdot 10^{-3} = 0,19726 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\tau = \frac{6}{0,19726} = 30,41 \text{ с};$$

$$\eta = \frac{2(10 \cdot 30,41 - 280)}{10 \cdot 30,41 \cdot 20 \cdot 10^{-2}} 100\% = 79,2\%;$$

$$V = \frac{20(100 - 79,2)}{10 \cdot 000 - 79,2 \cdot 20} 100\% = 4,9\%.$$

Ответ: $V = 4,9\%$.

Задания для самостоятельной работы

1. Определить содержание мелких частиц дисперсионной среды, оставшихся в шламе среди крупных частиц дисперсной фазы после окончания процесса грохочения. Начальное содержание крупных частиц в исходной неоднородной системе $\bar{x}_n = 65\%$ (масс.). Масса исходной неоднородной системы $Q = 78$ кг. Насыпная плотность частиц неоднородной системы $\rho_n = 1400$ кг/м³. Масса одной мелкой частицы дисперсионной среды $m = 20 \cdot 10^{-5}$ кг. Плотность мелких частиц дисперсионной среды $\rho = 2000$ кг п./м³ п. Диаметр отверстий в сите $d_{\text{эк}} = 0,07$ м. Длина сита $L = 3,5$ м. Ширина сита $B = 1,5$ м. Сито установлено под углом $\delta = 15^\circ$.

2. Определить содержание мелких частиц дисперсионной среды, оставшихся в шламе среди крупных частиц дисперсной фазы после окончания процесса грохочения. Начальное содержание крупных частиц в исходной неоднородной системе $\bar{x}_n = 60\%$ (масс.). Масса исходной неоднородной системы $Q = 80$ кг. Насыпная плотность частиц неоднородной системы $\rho_n = 1800$ кг/м³. Масса одной мелкой частицы дисперсионной среды $m = 30 \cdot 10^{-5}$ кг. Плотность мелких частиц дисперсионной среды $\rho = 2600$ кг п./м³ п. Диаметр отверстий в сите $d_{\text{эк}} = 0,08$ м. Длина сита $L = 5$ м. Ширина сита $B = 2$ м. Сито установлено под углом $\delta = 20^\circ$.

3. На грохоте проводится выделение полезных для народного хозяйства твёрдых компонентов нижнего класса. Насыпная плотность твёрдых отходов перед грохочением $\rho_n = 1500 \text{ кг/м}^3$, массовая производительность $G = 15 \text{ кг/с}$, ширина сита $B = 3 \text{ м}$, длина сита $L = 5 \text{ м}$, доля нижнего класса ($d < d_T$) в исходном материале $\alpha = 15\%$. Масса материала на сите $M = 300 \text{ кг}$. Определить содержание V нижнего класса частиц диаметром, меньшим диаметра отверстия сита твёрдых частиц, в надрешётном продукте после грохочения.

4. На грохоте проводится выделение полезных для народного хозяйства твёрдых компонентов нижнего класса. Насыпная плотность твёрдых отходов перед грохочением $\rho_n = 1100 \text{ кг/м}^3$, массовая производительность $G = 25 \text{ кг/с}$, ширина сита $B = 2,5 \text{ м}$, длина сита $L = 7 \text{ м}$, доля нижнего класса ($d < d_T$) в исходном материале $\alpha = 30\%$. Масса материала на сите $M = 350 \text{ кг}$. Определить содержание V нижнего класса частиц диаметром, меньшим диаметра отверстия сита твёрдых частиц, в надрешётном продукте после грохочения.

3.8. ПЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Теоретические основы пенной фильтрации

Пенная фильтрация (барботажно-пенное пылеулавливание, мокрая очистка газов, барботажная промывка газов, пенная промывка газов) – процесс разделения неоднородных систем с газовой дисперсионной средой при их движении через различного вида жидкие фильтровальные перегородки (слой жидкости, слой пены, пенно-жидкостный слой) под действием разности давлений до и после перегородки, создаваемой насосами; при этом перегородка задерживает твёрдые частицы или капли дисперсной фазы и пропускает газовую дисперсионную среду.

Неоднородную систему (загрязнённый воздух) подают в пылеуловитель; в этот же пылеуловитель на опорное устройство (решётку, тарелку и т.д.) подают фильтрующую жидкость. Загрязнённый воздух проходит через отверстия опорного устройства и барботирует (проходит в виде пузырьков) сквозь слой жидкости и сквозь слой пены, образовавшейся при взаимодействии дисперсионной среды (воздуха) и фильтрующей жидкости. При этом твёрдые частицы примесей ударяются о нижнюю поверхность жидкости, а затем, двигаясь под действием сил инерции и разности давлений, проникают в пенный слой и задерживаются там. При насыщении пенного слоя определённым количеством твёрдых частиц дисперсной фазы образующуюся смесь пены и твёрдых частиц сливают в шламоприёмник. Условно очищенный воздух выходит из аппарата через верхний штуцер.

Выделяют следующие стадии процесса пенной фильтрации:

1. Стадия инерционного осаждения частиц или капель дисперсной фазы в подрешёточном пространстве.

2. Стадия удара частиц или капель дисперсной фазы о фильтрующий пенно-жидкостный слой.

3. Стадия инерционно-турбулентного осаждения или всплывания частиц (капель) дисперсной фазы на поверхности пенно-жидкостного слоя; при этом частицы или капли примесей первоначально находятся в фильтрующем слое внутри пузырьков газовой дисперсионной среды, а затем переходят непосредственно в жидкую среду фильтрующего слоя.

Преобладающим в процессе пенной фильтрации является механизм удара (на стадии удара): эффективность этого механизма намного больше эффективности других механизмов (на 1 и 3 стадиях) [4, с. 51].

В процессе пенной фильтрации на частицы или капли примесей действуют различные силы, величина и направление которых зависят от степени смачивания этих частиц (капель). Смачивающиеся частицы (с гидрофильной поверхностью) втягиваются в пенно-жидкостный фильтрующий слой силой поверхностного натяжения (адгезия), действующей на границе жидкости и воздуха (на поверхности газовых пузырей). При этом, если плотность частицы (капли) примеси больше плотности фильтрующей жидкости, то кроме силы поверхностного натяжения (адгезии) на данную частицу (каплю), действует также и сила тяжести, поэтому частица тонет, а если плотность частицы (капли) примеси меньше плотности фильтрующей жидкости, то частица (капля) всплывает на поверхность жидкости или пены под действием выталкивающей силы.

Несмачивающиеся частицы (капли) примесей (с гидрофобной поверхностью) поддерживаются на поверхности фильтрующей жидкости силой поверхностного натяжения (адгезия). Твёрдые частицы (капли) примесей размером менее 10 мкм, независимо от величины их плотности, условно относятся к несмачиваемым частицам. Способность частиц примесей к смачиванию уменьшается с увеличением их дисперсности (разброса размеров) [14, с. 8–9].

Эффективность процесса пенной фильтрации зависит от величины межфазной поверхности: чем больше поверхность, тем больше эффективность.

Пример расчёта процесса пенной фильтрации

Ситуация. В пенном газоочистителе ЛТИ осуществляется процесс очистки газовых выбросов строительного предприятия от пыли. На-

чальная концентрация пыли в воздухе на входе в аппарат – $0,008 \text{ кг/м}^3$, конечная концентрация пыли в воздухе на выходе из аппарата – $8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^3$. Концентрация пыли в утекающей жидкости – $0,15 \text{ кг/л}$ ф.с., коэффициент распределения пыли между утекающей жидкостью и сливной жидкостью – $0,7$. Диаметр отверстий решётки 4 мм , шаг между отверстиями – $0,0087 \text{ м}$, скорость запылённого воздуха в отверстиях решётки – 10 м/с , отношение площади отверстий решётки к площади сечения аппарата – $0,95$, длина решётки – $2,1 \text{ м}$. Расход запылённого воздуха – $48\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расход фильтрующей жидкости – $0,989 \text{ кг/с}$.

Определить высоту сливного порога в процессе пенной фильтрации запылённого воздуха в пенном газоочистителе ЛТИ.

Дано: $C_n = 0,008 \frac{\text{кг} \cdot \text{п}}{\text{м}^3 \cdot \text{сл}}$, $C_k = 8 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг} \cdot \text{п}}{\text{м}^3 \cdot \text{сл}}$, $\bar{x}_y = 0,15 \frac{\text{кг} \cdot \text{п}}{\text{кг} \cdot \text{ф.с.}}$, $K_p = 0,7$, $d_o = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $t = 0,0087 \text{ м}$, $\omega_o = 10 \text{ м/с}$, $\varphi = 0,95$, $l_c = 2,1 \text{ м}$, $Q_n = 13,33 \text{ м}^3/\text{с}$, $L = 0,989 \text{ кг/с}$.

Найти: h_n .

Рекомендуемый ход решения. Высота сливного порога в процессе пенной фильтрации запылённого воздуха (формула (3.90) [16], [14])

$$h_n = 2,5 \cdot h_o - 0,0176 \sqrt[3]{i^2}.$$

Высота исходного слоя фильтрующей жидкости на решётке (формула (3.89) [16], [14])

$$h_o = 1,43H^{1,67} \omega_\phi^{-0,83}.$$

Высота слоя пены на решётке (формула (3.87) [16], [14])

$$H = k_n - 1,95\omega_\phi + 0,09.$$

Коэффициент скорости пылеулавливания (формула (3.88) [16], [14])

$$k_n = \frac{2\eta\omega_\phi}{2 - \eta}.$$

Эффективность очистки запылённого воздуха в пенном газоочистителе:

$$\eta = \frac{C_n - C_k}{C_n}, \quad \eta = \frac{0,008 - 8 \cdot 10^{-5}}{0,008} = 0,99.$$

Скорость пенной фильтрации

$$\omega = S_o \omega_o \varphi.$$

Доля свободного сечения решётки

$$S_o = \frac{d_o^2 \cdot 0,91}{t^2}, \quad S_o = \frac{(4 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,91}{0,0087^2} = 0,192.$$

Тогда

$$\omega_\phi = 0,192 \cdot 10 \cdot 0,95 = 1,82 \text{ м/с};$$

$$k_\pi = \frac{2 \cdot 0,99 \cdot 1,82}{2 - 0,99} = 3,58 \text{ м/с};$$

$$H = 3,58 - 1,95 \cdot 1,82 + 0,09 = 0,12 \text{ м};$$

$$h_o = 1,43 \cdot 0,12^{1,67} \cdot 1,82^{-0,83} = 0,0264 \text{ м}.$$

Интенсивность потока на сливе с решётки (формула (3.91) [16], [14]):

$$i = \frac{L_{\text{сл}}}{b_c}.$$

Расход фильтрующей жидкости, стекающей через сливной порог, (формула (3.92) [16], [14])

$$L_{\text{сл}} = L - L_y.$$

Расход фильтрующей жидкости, утекающей через отверстия опорной решётки, (формула (3.93) [16], [14])

$$L = \frac{G_\pi \cdot K_p}{\bar{x}_y}.$$

Расход уловленной пыли (формула (3.94) [16], [14]):

$$G_\pi = G_v C_\pi \eta, \quad G_\pi = 13,33 \cdot 0,008 \cdot 0,99 = 0,106 \text{ кг/с}.$$

Тогда

$$L_y = \frac{0,106 \cdot 0,7}{0,15} = 0,493 \text{ кг/с};$$

$$L_{\text{сл}} = 0,989 - 0,493 = 0,496 \text{ кг/с}.$$

Ширина сливного отверстия при прямоугольном сечении (для пенных газоочистителей ЛТИ) равна ширине опорной решётки и определяется из формулы

$$S = l_c b_c,$$

откуда

$$b_c = S/l_c.$$

Площадь сечения газоочистителя определяется по формуле (3.95) [14, 16]

$$Q_n = S\varphi_\Phi,$$

откуда

$$S = Q_n/\varphi_\Phi, \quad S = 13,33/1,82 = 7,32 \text{ м}^2.$$

Тогда

$$b_c = 7,32/2,1 = 3,49 \text{ м};$$

$$i = 0,496/3,49 = 0,142 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с});$$

$$h_n = 2,5 \cdot 0,0264 - 0,0176 \sqrt[3]{0,142^2} = 0,0612 \text{ м}.$$

Ответ: $h_n = 0,0612 \text{ м}.$

Задания для самостоятельной работы

1. Определить высоту сливного порога h_n в процессе пенной фильтрации запылённого воздуха в пенном газоочистителе ЛТИ. Начальная порозность неоднородной загрязнённой системы $\varepsilon_n = 0,492 \text{ кг д.с.}/\text{кг сл.}$ Конечная концентрация пыли в воздухе на выходе из аппарата $c_\kappa = 7,9 \cdot 10^{-5} \text{ кг п.}/\text{м}^3 \text{ сл.}$ Концентрация пыли в фильтрующей жидкости, утекающей через отверстия решётки, $\bar{x}_y = 0,14 \text{ кг п.}/\text{кг д.с.}/\text{кг сл.}$ Коэффициент распределения пыли между утекающей фильтрующей жидкостью и сливной фильтрующей жидкостью $K_p = 0,75$. Диаметр отверстий решётки $d_o = 0,005 \text{ м}$. Шаг между отверстиями решётки $t_o = 0,0077 \text{ м}$. Скорость запылённого воздуха в отверстиях решётки $\omega_o = 11 \text{ м}/\text{с}$. Отношение площади отверстий решётки к площади сечения аппарата $\varphi = 0,9$. Длина решётки $l_c = 10,3 \text{ м}$. Расход запылённого воздуха $Q_n = 150 \text{ м}^3/\text{с}$. Расход фильтрующей жидкости $L_{\text{фс}} = 58,9 \text{ кг д.с.}/\text{кг сл.}/\text{с}$. Плотность частиц примесей $\rho = 1550 \text{ кг п.}/\text{м}^3 \text{ п.}$ Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293 \text{ кг}/\text{м}^3$. Температура загрязнённой неоднородной системы $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$.

2. Определить высоту сливного порога h_n в процессе пенной фильтрации запылённого воздуха в пенном газоочистителе ЛТИ. Начальная порозность неоднородной загрязнённой системы $\varepsilon_n = 0,3 \text{ кг д.с.}/\text{кг сл.}$ Конечная концентрация пыли в воздухе на выходе из аппарата $c_\kappa = 7 \cdot 10^{-5} \text{ кг п.}/\text{м}^3 \text{ сл.}$ Концентрация пыли в фильтрующей жидкости, утекающей через отверстия решётки, $\bar{x}_y = 0,2 \text{ кг п.}/\text{кг д.с.}/\text{кг сл.}$ Коэффициент распределения пыли между утекающей фильтрующей жидкостью и сливной фильтрующей жидкостью $K_p = 0,7$. Диаметр отверстий решётки $d_o = 0,006 \text{ м}$. Шаг между отверстиями решётки $t_o = 0,008 \text{ м}$. Скорость запылённого воздуха в отверстиях решётки $\omega_o =$

= 12 м/с. Отношение площади отверстий решётки к площади сечения аппарата $\varphi = 0,8$. Длина решётки $l_c = 12$ м. Расход запылённого воздуха $Q_n = 170$ м³/с. Расход фильтрующей жидкости $L_{\text{фс}} = 70$ кг д.с./кг сл./с. Плотность частиц примесей $\rho = 1800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг/м³. Температура загрязнённой неоднородной системы $t = 30$ °С.

3. Определить высоту сливного порога h_n в процессе пенной фильтрации запылённого воздуха в пенном газоочистителе ЛТИ. Начальная порозность неоднородной загрязнённой системы $\varepsilon_n = 0,9$ кг д.с./кг сл. Конечная концентрация пыли в воздухе на выходе из аппарата $c_k = 8 \cdot 10^{-5}$ кг п./м³ сл. Концентрация пыли в фильтрующей жидкости, утекающей через отверстия решётки, $\bar{x}_y = 0,35$ кг п./кг д.с./кг сл.

Коэффициент распределения пыли между утекающей фильтрующей жидкостью и сливной фильтрующей жидкостью $K_p = 0,95$. Диаметр отверстий решётки $d_o = 0,009$ м. Шаг между отверстиями решётки $t_o = 0,005$ м. Скорость запылённого воздуха в отверстиях решётки $\omega_o = 16$ м/с. Отношение площади отверстий решётки к площади сечения аппарата $\varphi = 0,5$. Длина решётки $l_c = 7$ м. Расход запылённого воздуха $Q_n = 100$ м³/с. Расход фильтрующей жидкости $L_{\text{фс}} = 50$ кг д.с./кг сл./с. Плотность частиц примесей $\rho = 2500$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг/м³. Температура загрязнённой неоднородной системы $t = 20$ °С.

4. Определить высоту сливного порога h_n в процессе пенной фильтрации запылённого воздуха в пенном газоочистителе ЛТИ. Начальная порозность неоднородной загрязнённой системы $\varepsilon_n = 0,2$ кг д.с./кг сл. Конечная концентрация пыли в воздухе на выходе из аппарата $c_k = 10 \cdot 10^{-5}$ кг п./м³ сл. Концентрация пыли в фильтрующей жидкости, утекающей через отверстия решётки, $\bar{x}_y = 0,8$ кг п./кг д.с./кг сл.

Коэффициент распределения пыли между утекающей фильтрующей жидкостью и сливной фильтрующей жидкостью $K_p = 0,8$. Диаметр отверстий решётки $d_o = 0,003$ м. Шаг между отверстиями решётки $t_o = 0,0095$ м. Скорость запылённого воздуха в отверстиях решётки $\omega_o = 15$ м/с. Отношение площади отверстий решётки к площади сечения аппарата $\varphi = 0,6$. Длина решётки $l_c = 15$ м. Расход запылённого воздуха $Q_n = 350$ м³/с. Расход фильтрующей жидкости $L_{\text{фс}} = 70$ кг д.с./кг сл./с. Плотность частиц примесей $\rho = 1800$ кг п./м³ п. Плотность дисперсионной среды (чистого воздуха) $\rho_{c0} = 1,293$ кг/м³. Температура загрязнённой неоднородной системы $t = 35$ °С.

3.9. МЕМБРАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Теоретические основы мембранной фильтрации

Мембранная фильтрация (обратный осмос) – процесс молекулярно-ионного разделения неоднородных систем (эмульсий, реже коллоидных растворов) и однородных систем (растворов «жидкость–жидкость», реже смесей «газ–газ») при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (полупроницаемые пористые с диаметром пор 0,1...8 мкм или сплошные мембраны) под действием разности рабочего давления над системой и осмотического давления у поверхности фильтровальной перегородки; при этом перегородка пропускает растворитель и задерживает растворённое вещество.

Однородная система (раствор «жидкость–жидкость») подаётся в установку обратного осмоса. К однородной системе прикладывается давление, превышающее осмотическое давление, в результате чего молекулы и ионы одного из компонентов раствора (растворителя) начинают переходить через полупроницаемую мембрану во второе отделение аппарата, а молекулы и ионы других компонентов раствора (растворённых веществ) задерживаются мембраной в первом отделении. В результате полной реализации процесса однородная система (раствор) разделяется на пермеат (условно чистый растворитель). Загрязняющим компонентом в однородной системе может быть как пермеат, так и ретант.

Иногда пермеат и ретант называют, соответственно, фильтратом и концентратом.

В основе процесса мембранной фильтрации лежит явление осмоса – самопроизвольного перехода молекул и ионов растворителя через полупроницаемую мембрану в раствор. В зависимости от соотношения рабочего давления над раствором P и осмотического давления у поверхности мембраны Π изменяется направление перехода молекул и ионов растворителя.

Осмотическое давление – это давление у поверхности мембраны, при котором через мембрану из раствора переходит такое же количество растворителя $G_{п1}$, какое количество растворителя переходит обратно в раствор $G_{п2}$, иначе говоря, наступает равновесие.

Если рабочее давление P меньше осмотического π , то растворитель самостоятельно переходит в раствор, иначе говоря, происходит осмос. Если рабочее давление P больше осмотического π , то растворитель переходит через мембрану из раствора, т.е. происходит обратный осмос. При этом полупроницаемая мембрана, пропуская молекулы и ионы растворителя, задерживает молекулы и ионы растворённых веществ.

Движущей силой процесса мембранной фильтрации (в случае обратного осмоса) является разность рабочего давления P и осмотического давления раствора у поверхности мембраны Π_3 .

В реальных условиях мембраны не обладают идеальной полупроницаемостью, и наблюдается переход через мембрану не только молекул и ионов чистого растворителя, но и некоторого количества молекул и ионов растворённых веществ.

Такое явление изменяет движущую силу процесса (в случае обратного осмоса).

Механизм переноса молекул и ионов различных веществ через полупроницаемые мембраны объясняется следующими теориями.

1. Теория просеивания предполагает, что в полупроницаемой мембране существуют поры, размеры которых достаточны для того, чтобы пропускать молекулы и ионы растворителя, но слишком малы для того, чтобы пропускать молекулы и ионы растворённых веществ.

2. Теория молекулярной диффузии основана на неодинаковой растворимости и на различии коэффициентов диффузии разделяемых компонентов загрязнённой системы в объёме и порах мембраны.

3. Теория капиллярно-фильтрационной проницаемости основана на различии физико-химических свойств граничного слоя дисперсионной среды или растворителя на поверхности мембраны и частиц дисперсной фазы или раствора в объёме. На поверхности внутри пор (капилляров) мембраны, погружённой в раствор, возникает граничный слой связанного растворителя. Этот слой образует плёнку определённой толщины. Связанный в граничном слое растворитель теряет свою растворяющую способность по отношению к растворённым в объёме компонентам. Поэтому под действием перепада давления этот растворитель из граничного слоя перетекает по капиллярам через мембрану, если размер капилляров в мембране меньше размеров ионов и молекул растворённых веществ (меньше 20 \AA) [7, с. 432–433]. Но реальные мембраны имеют поры различного размера, в том числе и крупные (больше 20 \AA), поэтому часть молекул и ионов растворённых веществ может проникать через эти крупные капилляры. Следовательно, селективность (задерживающая способность) мембраны тем выше, чем больше толщина граничного слоя и чем больше размеры молекул и ионов растворённых веществ.

Процессы мембранной фильтрации характеризуются двумя основными параметрами: проницаемостью и селективностью мембраны.

Виды мембранной фильтрации:

– гиперфильтрация (обратный осмос) – выделение низкомолекулярных растворённых веществ из растворов под давлением через полупроницаемые мембраны;

- ультрафильтрация – выделение высокомолекулярных растворённых веществ из сточной воды;
- испарение через мембрану – испарение растворителя (чистой воды) через мембрану в вакуум или поток инертного газа;
- диализ – самопроизвольное ионное разделение однородных и неоднородных систем через полупроницаемую мембрану;
- диффузионное разделение газов – разделение газов под действием разности их концентраций по обе стороны мембраны [7, с. 429–430];
- микрофильтрация – выделение из загрязнённых систем частиц загрязнений размерами 0,02...10 мкм.

Примеры расчёта процесса мембранной фильтрации

Ситуация. В процессе водоподготовки осуществляется очистка воды от хлорида кальция. Теплота гидратации ионов Ca^{2+} – 1616 кДж/моль, ионов Cl^- – 352 кДж/моль, валентность иона с меньшей теплотой гидратации Cl^- равна 1. Константы, учитывающие конструкцию мембраны, давление и температуру, $a = 2,67$, $b = 1,420$. Начальная концентрация загрязнений CaCl_2 в исходном растворе сточной воды 0,8% (масс.), конечная концентрация CaCl_2 в ретанте – 3,2% (масс.). Расход исходного раствора воды – 5,56 кг/с.

Проверить правильность выбора мембраны МГА-90, предназначенной для очистки воды от CaCl_2 . Правильность выбора определяется допустимой величиной потерь CaCl_2 , проникающих в пермеат через мембрану в процентах от количества CaCl_2 в исходном растворе воды, равной 10%. Принять, что наблюдаемая селективной мембраны равна истинной.

Дано: $\Delta \bar{G}_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%$, $\Delta H_{\text{Ca}^{2+}} = 1616$ кДж/моль, $\Delta H_{\text{Cl}^-} = 352$ $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$,
 $Z_m = 1$, $a = 2,67$, $b = 1,420$, $\bar{x}_{\text{и}} = 0,8 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг} \cdot \text{п}}{\text{кг} \cdot \text{сл}}$, $\bar{x}_{\text{к}} = 3,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кг} \cdot \text{п}}{\text{кг} \cdot \text{сл}}$,
 $\bar{G}_{\text{н}} = 5,56$ кг/с, $\varphi = \varphi_{\text{н}}$.

Найти: $\Delta \bar{G}_{\text{пот}}$.

Рекомендуемый ход решения. Процентное соотношение потерь CaCl_2 с пермеатом и количества CaCl_2 с исходным раствором сточной воды

$$\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = \frac{\bar{I}_{\text{п}}}{L_{\text{н}}} 100\% < \Delta \bar{G}_{\text{пот}}^{\text{норм}}.$$

Потери CaCl_2 с пермеатом

$$\bar{L} = \bar{G}_n \bar{x}_2.$$

Расход пермеата (формула (3.107) [16])

$$\bar{G}_n = \bar{G}_n \left(1 - k^{-1/\phi} \right).$$

Степень концентрирования (формула (3.108) [16]):

$$k = \frac{\bar{x}_{1к}}{\bar{x}_{1н}}, \quad k = \frac{3,2 \cdot 10^{-2}}{0,8 \cdot 10^{-2}} = 4.$$

Наблюдаемая селективность мембраны (по условию задачи)

$$\phi = \phi_n.$$

Истинная селективность мембраны (формула (3.109) [16])

$$\phi_n = 1 - 10^{\frac{a-b \lg \frac{\Delta H_{c.r.}}{Z_m}}{1}}.$$

Среднее геометрическое значение теплот гидратации $n = 3$ ионов, образующих загрязнение CaCl_2

$$\Delta H_{c.r.} = \sqrt[3]{\Delta H_{\text{Ca}^{+2}} \Delta H_{\text{Cl}^-} \Delta H_{\text{Cl}^-}},$$

$$\Delta H_{c.r.} = \sqrt[3]{1616 \cdot 352 \cdot 352} = 585 \text{ кДж/моль}.$$

Тогда

$$\phi_n = 1 - 10^{2,67 - 1,420 \lg \frac{585}{1}} = 0,945;$$

$$\phi = 0,945;$$

$$\bar{G}_n = 5,56 \left(1 - 4^{-\frac{1}{0,945}} \right) = 4,28 \frac{\text{кг} \cdot \text{перм.}}{\text{с}}.$$

Средняя концентрация загрязнения в пермеате (формула (3.110) [16])

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_{1н} \frac{1 - K^{-1-\phi}}{1 - K^{-1/\phi}}, \quad \bar{x}_2 = 0,8 \cdot 10^{-2} \frac{1 - 4^{-\frac{1-0,945}{0,945}}}{1 - 4^{-\frac{1}{0,945}}} = 8,06 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{пр}}{\text{кг} \cdot \text{перм.}}.$$

Тогда

$$\bar{L}_n = 4,28 \cdot 8,06 \cdot 10^{-4} = 34,49 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{пр./с}.$$

Расход загрязнений с исходным раствором

$$\bar{L}_n = \bar{G}_n \bar{x}_{1n}, \quad \bar{L}_n = 5,56 \cdot 0,8 \cdot 10^{-2} = 444,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг} \cdot \text{пр.}}{\text{с}}.$$

Тогда

$$\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = \frac{34,49 \cdot 10^{-4}}{444,8 \cdot 10^{-4}} 100\% = 7,75\%.$$

Так как

$$\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = 7,75\% < \Delta \bar{G}_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%,$$

то мембрана МГА-90 пригодна для очистки воды от CaCl_2 .

Ответ: $\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = 7,75\%$.

Ситуация. Предполагается произвести доочистку воды от хлорида кальция в мембранной установке. Удельная производительность мембраны на входе раствора воды в аппарат – $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, на входе ретанта из аппарата – $1,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Начальная плотность раствора воды – $1004 \text{ кг}/\text{м}^3$, конечная плотность ретанта – $1023 \text{ кг}/\text{м}^3$. Площадь сечения аппарата, по которому проходит разделяемый раствор воды, равна $2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Число аппаратов в первой секции установки мембранной фильтрации – 21, в последней секции – 5. Высота напорного канала, равная толщине сетки сепаратора, – $5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Средний коэффициент динамической вязкости раствора воды – $0,95 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, средняя плотность равна среднеарифметическому начальной и конечной плотностей воды. Коэффициент диффузии – $1,281 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$. Длина напорного канала, равная ширине пакета мембран, – $0,83 \text{ м}$. Начальная концентрация загрязнений CaCl_2 в исходном растворе воды – $0,8\%$ (масс.); расход исходного раствора – $5,56 \text{ кг}/\text{с}$; допустимая величина потерь CaCl_2 – 10% , степень концентрирования – 4 ; расход загрязнений с исходным раствором – $444,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг пр.}/\text{с}$; истинная селективность мембраны – $0,945$; расход пермеата – $4,28 \text{ кг}/\text{с}$.

Проверить правильность выбора мембраны МГА-90 для очистки сточной воды от CaCl_2 по наблюдаемой селективности, не равной истинной селективности.

Дано: $\varphi \neq \varphi_n, \quad \bar{\omega}_{\text{сн}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}, \quad \bar{\omega}_{\text{ск}} = 1,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}},$

$\rho_{\text{сл}}^{\text{н}} = 1004 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad \rho_{\text{сл}}^{\text{к}} = 1023 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad S_c = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2, \quad n_1 = 21, \quad n_k = 5, \quad d_c = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м},$
 $\mu_{\text{сл}} = 0,95 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}, \quad D = 1,281 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}, \quad l'_k = 0,83 \text{ м},$

$\bar{x}_{\text{н}} = 0,8 \cdot 10^{-2}$ кг/кг, $\bar{G}_{\text{н}} = 5,56$ кг/с, $\Delta \bar{G}_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%$, $K = 4$, $\bar{L}_{\text{н}} = 444,8 \times 10^{-4}$ кг.пр/с, $\beta_{\text{н}} = 0,945$, $\bar{G}_{\text{п}} = 4,28$ кг/с.

Найти: $\Delta \bar{G}_{\text{пот}}$.

Рекомендуемый ход решения. Процентное соотношение потерь CaCl_2 с пермеатом и количества CaCl_2 с исходным раствором сточной воды

$$\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = \frac{\bar{L}_{\text{п}}}{\bar{L}_{\text{н}}} 100\% \leq \Delta \bar{G}_{\text{пот}}^{\text{норм}}$$

Потери CaCl_2 с пермеатом

$$\bar{L}_{\text{п}} = \bar{G}_{\text{п}} \bar{x}_2.$$

Расход пермеата (формула (3.107) [16])

$$\bar{G}_{\text{п}} = \bar{G}_{\text{н}} \left(1 - k \frac{1}{\varphi} \right).$$

Наблюдаемая селективность мембраны при $\varphi \neq \varphi_{\text{н}}$ определяется по формуле (3.111) [16]

$$\rho_{\text{сл}} = \frac{\rho_{\text{н}} + \rho_{\text{к}}}{2};$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 10^{\frac{\omega_{\text{ф}}}{2,3\beta} + \lg \frac{1-\varphi_{\text{н}}}{\varphi_{\text{н}}}}}.$$

Скорость фильтрации (поперечный поток) (формула (3.113) [16])

$$\omega'_{\text{ф}} = \frac{\bar{\omega}_{\text{с}}}{\rho_{\text{сл}}}.$$

Средняя удельная производительность мембраны (формула (3.114) [16])

$$\bar{\omega}_{\text{с}} = \frac{\bar{\omega}_{\text{сн}} + \bar{\omega}_{\text{ск}}}{2}, \quad \bar{\omega}_{\text{с}} = \frac{2,7 \cdot 10^{-3} + 1,8 \cdot 10^{-3}}{2} = 2,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Средняя плотность сточной воды в процессе мембранной фильтрации (по условию задачи)

$$\rho_{\text{сл}} = \frac{\rho_{\text{сл}}^{\text{н}} + \rho_{\text{сл}}^{\text{к}}}{2}, \quad \rho_{\text{сл}} = \frac{1004 + 1023}{2} = 1013,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Тогда

$$\omega'_\phi = \frac{2,25 \cdot 10^{-3}}{1013,5} = 2,22 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Коэффициент массоотдачи (формула (3.115) [16])

$$\beta = \frac{\text{Nu}'D}{d'_{\text{ЭК}}}.$$

Критерий Нуссельта (формула (3.116) [16])

$$\text{Nu}' = 1,67 \text{Re}^{0,34} (\text{Pr}')^{0,33} \left(\frac{d'_{\text{ЭК}}}{l'_k} \right)^{0,3}$$

Критерий Рейнольдса (формула (3.117) [16])

$$\text{Re} = \frac{\bar{\omega}' d'_{\text{ЭК}} \rho_{\text{сд}}}{\mu_{\text{сд}}}.$$

Средняя линейная скорость движения раствора сточной воды в каналах между мембранами (формула (3.118) [16])

$$\bar{\omega}' = \frac{1}{2} \left(\frac{G_{\text{H}}}{\rho_{\text{сд}}^{\text{H}} S_{\text{с}} n_1} + \frac{G_{\text{K}}}{\rho_{\text{сд}}^{\text{K}} S_{\text{с}} n_{\text{K}}} \right).$$

Расход ретанта определяется из уравнения материального баланса мембранной фильтрации

$$\bar{G}_{\text{H}} = \bar{G}_{\text{K}} + \bar{G}_{\text{П}},$$

откуда

$$\bar{G}_{\text{K}} = \bar{G}_{\text{H}} - \bar{G}_{\text{П}}, \quad \bar{G}_{\text{K}} = 5,56 - 4,28 = 1,28 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Тогда

$$\bar{\omega}' = \frac{1}{2} \left(\frac{5,56}{1004 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot 21} + \frac{1,28}{1023 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot 5} \right) = 0,114 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Эквивалентный диаметр кольцевого канала между мембранами

$$d'_{\text{ЭК}} = 2d_{\text{с}}, \quad d'_{\text{ЭК}} = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 0,001 \text{ м}.$$

Тогда

$$\text{Re} = \frac{0,114 \cdot 0,001 \cdot 1013,5}{0,95 \cdot 10^{-3}} = 121,62.$$

Критерий Прандтля

$$\text{Pr}' = \frac{\mu_{\text{сл}}}{\rho_{\text{сл}} D}, \quad \text{Pr}' = \frac{0,95 \cdot 10^{-3}}{1013,5 \cdot 1,281 \cdot 10^{-9}} = 731,73.$$

Тогда

$$\text{Nu}' = 1,67 \cdot 121,62^{0,34} \cdot 731,73^{0,33} \left(\frac{0,001}{0,83} \right)^{0,3} = 10,02;$$

$$\beta = \frac{10,02 \cdot 1,281 \cdot 10^{-9}}{0,001} = 12,84 \cdot 10^{-6} \frac{\text{М}}{\text{с}};$$

$$\varphi = \frac{1}{1 + 10^{\frac{2,22 \cdot 10^{-6}}{2,3 \cdot 12,84 \cdot 10^{-6}} + \lg \frac{1-0,945}{0,945}}} = 0,935;$$

$$\bar{G}_{\text{п}} = 5,56 \left(1 - 4^{-\frac{1}{0,935}} \right) = 4,3 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Средняя концентрация загрязнения в пермеате (формула (3.110) [16])

$$\bar{x}_2 = \bar{x}_{1\text{н}} \frac{1-k \frac{1-\varphi}{\varphi}}{1-k \frac{1}{\varphi}}, \quad \bar{x}_2 = 0,8 \cdot 10^{-2} \frac{1-4^{-\frac{1-0,935}{0,935}}}{1-4^{-\frac{1}{0,935}}} = 9,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг.пр}}{\text{кг.перм.}}.$$

Тогда

$$\bar{L}_{\text{п}} = 4,3 \cdot 9,5 \cdot 10^{-4} = 40,89 \cdot 10^{-4} \frac{\text{кг.пр}}{\text{с}};$$

$$\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = \frac{40,89 \cdot 10^{-4}}{444,8 \cdot 10^{-4}} 100\% = 9,2\%;$$

$$\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = 9,2\% < \Delta \bar{G}_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%.$$

Следовательно, мембрана МГА-90 пригодна для очистки сточной воды от CaCl_2 .

Ответ: $\Delta \bar{G}_{\text{пот}} = 9,2\%$.

Ситуация. В установке обратного осмоса осуществляется доочистка сточной воды. Эквивалентный диаметр кольцевого канала между мембранами – 0,0012 м. Начальная плотность сточной воды – 1000 кг/м^3 ,

средняя плотность сточной воды – 1015 кг/м^3 , средний коэффициент динамической вязкости сточной воды – $1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Средняя линейная скорость движения сточной воды в каналах между мембранами – $0,2 \text{ м/с}$. Длина напорного канала, равная ширине пакета мембран, – $0,83 \text{ м}$. Число секций в данном аппарате – 14 , число модулей мембран в каждой секции – 2 . Средняя удельная производительность мембраны – $3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. Длина одной секции – $0,95 \text{ м}$. Коэффициент, зависящий от вида сепарирующей сетки, – $5,6$. Коэффициент вида дренажного материала – 150 . Геометрическая высота между входом и выходом аппарата – $0,02 \text{ м}$. Перепад рабочего давления – 5 МПа . Толщина дренажной сетки – $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Определить потребный напор насоса для подачи загрязнённой сточной воды на очистку в установку обратного осмоса.

Дано: $\bar{d}'_{\text{ЭК}} = 0,0012 \text{ м}$, $\rho_{\text{сл}}^{\text{H}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{сл}} = 1015 \text{ кг/м}^3$, $\mu_{\text{сл}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\bar{\omega}' = 0,2 \text{ м/с}$, $l'_{\text{к}} = 0,83 \text{ м}$, $n = 14$, $n_{\text{м}} = 2$, $\bar{\omega}_{\text{с}} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$, $l_{\text{п}} = 0,95 \text{ м}$, $\varepsilon_1 = 5,6$, $\varepsilon_2 = 150$, $h_{\text{г}} = 0,02 \text{ м}$, $\Delta P = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}\cdot\text{с}$, $\delta_{\text{д}} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Найти: H .

Рекомендуемый ход решения. Потребный напор насоса для подачи сточной воды в аппарат

$$H = \frac{\Delta P_{\text{H}}}{\rho_{\text{сл}}^{\text{H}} g}.$$

Развиваемое насосом давление (формула (3.119) [16])

$$\Delta P_{\text{H}} = \Delta P + \Delta P_{\text{а}} + \Delta P_{\text{д}} + \Delta P_{\text{г}} + \Delta P_{\text{г}}.$$

Гидравлическое сопротивление при течении сточной воды в каналах, образованных сетками сепараторами, (формула (3.120) [16])

$$\Delta P_{\text{а}} = \Delta P_{\text{п.к.1}} \theta_1.$$

Гидравлическое сопротивление полых каналов сеток сепараторов (формула (3.121) [16])

$$\Delta P_{\text{п.к.1}} = \lambda \frac{l}{d'_{\text{ЭК}}} \frac{\rho_{\text{сл}} (\bar{\omega}')^2}{2}.$$

Общий коэффициент сопротивления движению сточной воды в каналах мембраны (формула (3.43) [16])

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34.$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\bar{w}' d'_{\text{эк}} \rho_{\text{сл}}}{\mu_{\text{сл}}}, \quad Re = \frac{0,2 \cdot 0,0012 \cdot 1015}{1 \cdot 10^{-3}} = 243,6.$$

Тогда

$$\lambda = \frac{133}{243,6} + 2,36 = 2,9.$$

Общая длина движения сточной воды в мембранном аппарате

$$l = n n_{\text{м}} l'_{\text{м}}, \quad l = 14 \cdot 2 \cdot 0,83 = 23,24 \text{ м.}$$

Тогда

$$\Delta P_{\text{п.к1}} = 2,9 \frac{23,24}{0,0012} \frac{1015 \cdot 0,2^2}{2} = 1\,142\,465 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\text{а}} = 1\,142\,465 \cdot 5,6 = 6\,397\,807 \text{ Па.}$$

Гидравлическое сопротивление движению сточной воды в дренажах (формула (3.122) [16])

$$\Delta P_{\text{д}} = \Delta P_{\text{п.к.2}} \theta_2.$$

Гидравлическое сопротивление полых каналов дренажа

$$\Delta P_{\text{п.к.2}} = 96 \frac{\mu_{\text{сл}} \bar{w}_{\text{с}} (l_{\text{п}} - 0,05^2)}{\rho_{\text{сл}} (d''_{\text{эк}})^3}.$$

Эквивалентный диаметр полого канала дренажной сетки:

$$d''_{\text{эк}} = 2\delta_{\text{д}}, \quad d''_{\text{эк}} = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Тогда

$$\Delta P_{\text{п.к.2}} = 96 \frac{1 \cdot 10^{-3} (0,95 - 0,05)^2}{1015 (6 \cdot 10^{-4})^3} = 1064 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{\text{д}} = 1064 \cdot 150 = 159\,606 \text{ Па.}$$

Потери давления на трение и местные сопротивления в трубопроводах и арматуре примем по формуле (3.123) [16]

$$\Delta P_{\text{г}} = 0,1 \Delta P_{\text{а}}, \quad \Delta P_{\text{г}} = 0,1 \cdot 6\,397\,807 = 639\,780,7 \text{ Па.}$$

Потери давления при подъёме загрязнённого раствора на определённую геометрическую высоту (формула (3.124) [16])

$$\Delta P_{\text{г}} = c_{\text{сл}} g h_{\text{г}}, \quad \Delta P_{\text{г}} = 1015 \cdot 9,81 \cdot 0,02 = 199 \text{ Па.}$$

Тогда

$$\Delta P_{\text{н}} = 5 \cdot 10^6 + 6\,397\,807 + 159\,606 + 639\,780,7 + 199 = 12\,197\,392,7 \text{ Па};$$

$$H = \frac{12\,197\,392,7}{1000 \cdot 9,81} = 1243,4 \text{ м.}$$

Ответ: $H = 1243,4 \text{ м.}$

Задания для самостоятельной работы

1. Проверить правильность выбора мембраны МГА-90 для очистки сточной воды от примесей MgCl_2 по величине потерь MgCl_2 , проникающих в пермеат через мембрану $\Delta G'_{\text{пот}}$. Допустимая величина потерь MgCl_2 , проникающих в пермеат через мембрану, в процентах от количества MgCl_2 ρ исходным раствором сточной воды, составляет $\Delta G'_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%$. Теплота гидратации ионов Mg^{2+} равна $\text{ДН}_{\text{Mg}^{2+}} = 1955 \text{ кДж/моль}$. Теплота гидратации ионов Cl^{1-} равна $\text{ДН}_{\text{Cl}^{1-}} = 352 \text{ кДж/моль}$. Валентность иона ρ с меньшей теплотой гидратации (Cl^{1-}) равна $Z_{\text{м}} = 1$. Константы, учитывающие конструкцию мембраны, давление и температуру в аппарате, равны $a = 2,67$, $b = 1,420$. Начальная концентрация примесей MgCl_2 в исходном растворе сточной воды $x'_{\text{н}} = 0,7 \cdot 10^{-2} \text{ кг п./кг сл.}$, конечная концентрация примесей MgCl_2 в ретанте $x'_{\text{к}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ кг п./кг сл.}$ Расход исходного раствора сточной воды $G'_{\text{н}} = 3,56 \text{ кг сл./с.}$ Принять, что наблюдаемая селективность мембраны равна истинной: $\phi = \phi_{\text{и}}$.

2. Определить расход примесей NaCl ρ с исходным раствором $L'_{\text{н}}$. Величина потерь NaCl , проникающих в пермеат через мембрану, в процентах от количества NaCl ρ исходным раствором сточной воды, составляет $\Delta G'_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%$. Наблюдаемая селективность мембраны не равна истинной: $\phi \neq \phi_{\text{и}}$. Удельная производительность мембраны на входе раствора сточной воды в аппарат $\omega'_{\text{сн}} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, на выходе ретанта из аппарата $\omega'_{\text{ск}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$. Начальная плотность раствора сточной воды $\rho_{\text{сл0}}^{\text{н}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, конечная плотность ретанта $\rho_{\text{сл0}}^{\text{к}} = 1020 \text{ кг/м}^3$. Площадь рабочего сечения установки мембранной фильтрации, по которому проходит очищаемый раствор сточной воды, равна $S_{\text{с}} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. Число аппаратов в первой секции установки мембранной фильтрации $n_{\text{н}} = 27$, в последней секции $n_{\text{к}} = 7$. Высота напорного канала, равная толщине сетки сепаратора, $d_{\text{с}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$. Длина напорного канала, равная ширине пакета мембран, $l'_{\text{к}} = 0,83 \text{ м}$.

Средний коэффициент динамической вязкости раствора сточной воды $\mu_{\text{сл}} = 0,99 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Средняя плотность раствора сточной воды $\rho_{\text{сл}} = (\rho_{\text{сл}}^{\text{H}} + \rho_{\text{сл}}^{\text{K}})/2,3$. Коэффициент диффузии $D = 1,281 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Начальная концентрация примесей NaCl в исходном растворе сточной воды $\bar{x}_{\text{H}} = 0,7 \cdot 10^{-2}$ кг п./кг сл. Расход исходного раствора сточной воды $\bar{G}_{\text{H}} = 4,6$ кг сл./с. Степень концентрирования $K = 5$. Истинная селективность мембраны $\varphi_{\text{H}} = 0,95$. Расход пермеата при $\varphi = \varphi_{\text{H}}$ равен $\bar{G}_{\text{H}} = 4,8$ кг сл./с. Температура в аппарате $t = 50$ °С.

3. Определить расход примесей NaCl ρ исходным раствором L'_{H} . Величина потерь NaCl, проникающих в пермеат через мембрану, в процентах от количества NaCl ρ исходным раствором сточной воды, составляет $\Delta G_{\text{пот}}^{\text{норм}} = 10\%$. Наблюдаемая селективность мембраны не равна истинной: $\varphi \neq \varphi_{\text{H}}$. Удельная производительность мембраны на входе раствора сточной воды в аппарат $\omega'_{\text{сн}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с), на выходе ретанта из аппарата $\omega'_{\text{ск}} = 1,45 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с). Начальная плотность раствора сточной воды $\rho_{\text{сл}0}^{\text{H}} = 999$ кг/м³, конечная плотность ретанта $\rho_{\text{сл}0}^{\text{K}} = 1010$ кг/м³. Площадь рабочего сечения установки мембранной фильтрации, по которому проходит очищаемый раствор сточной воды, равна $S_{\text{с}} = 2,16 \cdot 10^{-3}$ м². Число аппаратов в первой секции установки мембранной фильтрации $n_{\text{H}} = 25$, в последней секции $n_{\text{K}} = 7$. Высота напорного канала, равная толщине сетки сепаратора, $d_{\text{с}} = 5 \cdot 10^{-4}$ м. Длина напорного канала, равная ширине пакета мембран, $l'_{\text{K}} = 0,83$ м. Средний коэффициент динамической вязкости раствора сточной воды $\mu_{\text{сл}} = 0,92 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Средняя плотность раствора сточной воды $\rho_{\text{сл}} = (\rho_{\text{сл}}^{\text{H}} + \rho_{\text{сл}}^{\text{K}})/3$. Коэффициент диффузии $D = 1,281 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Начальная концентрация примесей NaCl в исходном растворе сточной воды $\bar{x}_{\text{H}} = 0,76 \cdot 10^{-2}$ кг п./кг сл. Расход исходного раствора сточной воды $\bar{G}_{\text{H}} = 4,9$ кг сл./с. Степень концентрирования $K = 5$. Истинная селективность мембраны $\varphi_{\text{H}} = 0,97$. Расход пермеата при $\varphi = \varphi_{\text{H}}$ равен $\bar{G}_{\text{H}} = 4,9$ кг сл./с. Температура в аппарате $t = 30$ °С.

4. Определить перепад рабочего давления ΔP в установке обратного осмоса, необходимый для осуществления процесса очистки сточной воды. Эквивалентный диаметр кольцевого канала между мембранами $d'_{\text{ЭК}} = 0,002$ м. Начальная плотность сточной воды $\rho_{\text{сл}0}^{\text{H}} = 999$ кг/м³. Средняя плотность сточной воды $\rho_{\text{сл}0} = 1025$ кг/м³. Средний коэффициент

динамической вязкости раствора сточной воды $\mu_{\text{сл}} = 1,007 \cdot 10^{-3}$ Па·с. Потребный напор насоса для подачи загрязнённой сточной воды на очистку в установку обратного осмоса $H = 1500$ м. Средняя линейная скорость движения сточной воды в каналах между мембранами $\bar{w}' = 0,21$ м/с. Длина напорного канала, равная ширине пакета мембран, $l'_k = 0,83$ м. Число секций в данном аппарате $n = 8$. Число модулей мембран в каждой секции $n_m = 3$. Длина одной секции $l_n = 0,95$ м. Коэффициент, зависящий от вида сепарирующей сетки, $\varepsilon_1 = 5,8$. Коэффициент, зависящий от вида дренажного материала, $\varepsilon_2 = 170$. Толщина дренажной сетки $\delta_d = 3 \cdot 10^{-4}$ м. Геометрическая высота между входом и выходом в аппарате $h_r = 0,003$ м. Средняя удельная производительность мембраны $\bar{w}_c = 2,9 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с). Температура в очистном аппарате $t = 50$ °С.

3.10. ЭЛЕКТРОМЕМБРАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

Теоретические основы электромембранной фильтрации

Электромембранная фильтрация (электродиализ, электроосмос, электрохимический метод) – процесс ионного разделения однородных систем (растворов Ж–Ж) при их движении через различного вида твёрдые фильтровальные перегородки (катионитовые и анионитовые диафрагмы – мембраны); при этом ионы определённого знака двигаются к катоду или аноду под действием постоянного электрического тока, проходя через перегородку определённого знака, но задерживаясь этой же перегородкой на обратном пути.

Сущность электромембранной фильтрации состоит в следующем. В центральную камеру аппарата подаётся исходная вода. При включении тока отрицательно заряженные ионы (анионы) загрязнений Cl^- начинают двигаться к аноду, проходя сквозь диафрагму. На аноде выделяются кислород и водород и образуется кислота HCl . Одновременно положительно заряженные ионы (катионы) загрязнений (натрия) переносятся к катоду, на котором выделяются водород и гидроксильная группа OH^- и образуется щёлочь NaOH . С течением времени большая часть анионов и катионов загрязнений уходит из центральной части аппарата, где остаётся очищенная вода. Обратный переход анионов и катионов из боковых камер в центральную затруднён диафрагмами, но при этом ионы H^+ и OH^- могут свободно проникать из боковых камер в центральную.

Процесс электромембранной фильтрации основан на следующих механизмах:

- 1) электрофорез – движение заряженных ионов загрязнений к электродам определённого знака под действием электрического тока;
- 2) электроосаждение – осаждение заряженных ионов загрязнений на электроде определённого знака под действием электрического тока;
- 3) электродиализ – переход заряженных ионов через пористую мембрану под действием электрического тока;
- 4) электроосмос – движение заряженных ионов в порах мембраны под действием электрического тока;
- 5) ионный обмен – диссоциация и переход ионов определённого знака в раствор с последующей их ассоциацией ионами противоположного знака [10, с. 202–203].

Пример расчёта процесса электромембранной фильтрации

Ситуация. На теплоэлектростанции проводится очистка щелоче-содержащих сточных вод с последующим концентрированием щёлочи с помощью электромембранной установки типа фильтр-пресс с замкнутой циркуляцией раствора по тракту ретанта. Расход сточных вод – 100 м³/сут. Концентрация щёлочи в сточной воде: исходная – 2% (масс.), в пермеате – 0,02% (масс.), в ретанте – 8% (масс.). Удельная производительность мембраны по пермеату – 9 см³/см²·мин. Напряжение питающего источника – 220 В. Электродное напряжение – 4 В. Среднее внутреннее сопротивление одной камеры – 3·10⁻² Ом. Плотность тока – 0,009 А/см². Диаметр проточного отверстия в мембране – 0,02 мм. Общая площадь одного мембранного элемента – 3000 см².

Определить необходимое число камер разделения в электромембранной установке.

Дано: $Q_{\text{сут}} = 100 \text{ м}^3/\text{сут}$, $\bar{x}_{1\text{н}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$, $\bar{x}_{1\text{п}} = 0,02 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$, $\bar{x}_{1\text{к}} = 8 \cdot 10^{-2} \text{ кг/кг}$, $G_0 = 9 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$, $U = 220 \text{ В}$, $E_3 = 4 \text{ В}$, $R = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$, $j = 0,009 \text{ А/см}^2$, $d_{\text{пер}} = 0,02 \text{ мм}$, $F_{\text{н}} = 3000 \text{ см}^2$.

Найти: n .

Рекомендуемый ход решения. Число камер разделения определяется как

$$n = \max(n_3; n_{\text{раб}}).$$

Число камер разделения в аппарате с учетом наложения электрического поля на электробаромембранный аппарат (формула (6) [17])

$$n_3 = \frac{U - (E_3 + 2E_M)}{jF_3R}.$$

Удельная производительность по пермеату (формула (2) [17])

$$G = G_0 \left(1 - k \frac{1}{\varphi} \right).$$

Коэффициент (степень) концентрирования (формула (3.108) [16])

$$k = \frac{\bar{x}_{1к}}{\bar{x}_{1н}}, \quad k = \frac{0,08}{0,02} = 4.$$

Коэффициент задержания мембраны по щёлочи (формула (1) [17])

$$K_R = 1 - \frac{2\bar{x}_{1н}}{\bar{x}_{1н} + \bar{x}_{1к}}, \quad K_R = 1 - \frac{2 \cdot 0,0002}{0,02 + 0,08} = 0,996.$$

Тогда

$$G = 9 \left(1 - 4 \frac{1}{0,996} \right) = 6,76 \frac{\text{см}^3}{\text{см}^2 \cdot \text{мин}}.$$

Рабочая площадь мембраны в аппарате (формула (3) [17])

$$F = \frac{Q_{\text{мин}}}{G}.$$

Минутный расход сточной воды

$$Q_{\text{мин}} = \frac{10^6 Q_{\text{сут}}}{24 \cdot 60}, \quad Q_{\text{мин}} = \frac{10^6 \cdot 100}{24 \cdot 60} = 69\,445 \frac{\text{см}^3}{\text{мин}}.$$

Тогда

$$F = \frac{69\,445}{6,76} = 10\,273 \text{ см}^2.$$

Мембранное напряжение (формула (7) [17])

$$E_M = 0,2 \log \frac{\bar{x}_{1к}}{\bar{x}_{1н}}, \quad E_M = 0,2 \log \frac{0,08}{0,0002} = 0,52 \text{ В}.$$

Рабочая площадь одного электробаромембранного элемента, включающего две мембраны, (формула (4) [17])

$$F_3 = 2F_H - \frac{\pi d_{\text{пер}}^2}{2}, \quad F_3 = 2 \cdot 3000 - \frac{3,14 \cdot 0,02 \cdot 10^{-1}}{2} = 5999 \text{ см}^2.$$

Тогда

$$n_3 = \frac{220 - (4 + 2 \cdot 0,52)}{0,09 \cdot 5999 \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 13,27 \approx 14 \text{ шт.}$$

Рабочее число камер (формула (9) [17])

$$n_{\text{раб}} = \frac{F}{F_3}, \quad n_{\text{раб}} = \frac{10\,273}{5999} = 1,7 \approx 2 \text{ шт.}$$

Тогда

$$n = \max(14; 2) = 14 \text{ шт.}$$

Ответ: $n = 14$ шт.

Ситуация. Для целей производства технической продукции на предприятии, находящемся на берегу Балтийского моря, осуществляется опреснение морской воды в количестве $15 \text{ м}^3/\text{ч}$ в электродиализной опреснительной мембранной установке. Расстояние между мембранами (перемычками) – $0,12 \text{ см}$. Эквивалентное расстояние между мембранами – $0,08 \text{ см}$. Ширина прохода воды в камере – 50 см . Число парных мембран – 200 шт. Работает один электролизёр. Параметры, зависящие от конструкции камеры, типа турбулизатора-сепаратора – $2,5$. Параметр, зависящий от соотношения коэффициентов диффузии растворённых в воде солей и её температуры, – $0,67$. Средняя концентрация растворённых солей в опресняемой воде в конце цикла – $0,03 \text{ г-экв}$. Электродное напряжение – 4 В . Мембранное напряжение в начале цикла – $0,06 \text{ В}$, в конце цикла – $0,08 \text{ В}$. Внутреннее сопротивление одной камеры в начале цикла – $2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$, в конце цикла – $4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$. Общая площадь одного мембранного элемента – 2500 см^2 . Расчётная плотность тока – $0,008 \text{ А/см}^2$. Мощность двигателей рабочих циркуляционных насосов – $0,8 \text{ кВт}$. Число рабочих циркуляционных насосов – 2 шт.

Определить производительность рабочих циркуляционных насосов для перекачки опресняемой воды и рассола и общий расход тока на очистку воды.

Дано: $Q_{\text{час}} = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$, $l = 0,12 \text{ см}$, $l_3 = 0,08 \text{ см}$, $B_1 = 50 \text{ см}$, $n = 200 \text{ шт.}$, $m = 1$, $B = 2,5$, $p = 0,67$, $C = 0,03 \text{ г-экв}$, $E_3 = 4 \text{ В}$, $E_{\text{М}}^{\text{H}} = 0,06 \text{ В}$, $E_{\text{М}}^{\text{K}} = 0,08 \text{ В}$, $R_{\text{H}} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$, $R_{\text{K}} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$, $F_{\text{H}} = 2500 \text{ см}^2$, $I = 0,008 \text{ А/см}^2$, $N_{\text{д}} = 0,8 \text{ кВт}$, $N = 2 \text{ шт.}$

Найти: a_{H} , W .

Рекомендуемый ход решения. Производительность циркуляционных насосов для перекачки опресняемой воды и рассола (формула (2.49) [18])

$$a_{\text{H}} = mnlB_1v_{\text{д}}$$

Деполаризующая скорость движения воды и рассола в камерах электролизёра (формула (2.48) [18])

$$v_d = \frac{B j_k^{1/p}}{C^{1/p} l_3}$$

Плотность тока (формула (2.47) [18])

$$j = \frac{U - (E_3 + 2nE_M)}{F_H n R} \text{ А/см}^2.$$

Напряжение на установке, необходимое для поддержания расчётной плотности тока, В (формула (2.46) [18])

$$U = IF_H n R_{cp} + E_3 + 2n E_M^{cp}.$$

Внутреннее сопротивление одной камеры в среднем за цикл

$$R_{cp} = \frac{R_H + R_K}{2}, \quad R_{cp} = \frac{4 \cdot 10^{-2} + 2 \cdot 10^{-2}}{2} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ Ом.}$$

Мембранное напряжение в среднем за цикл

$$E_M^{cp} = \frac{E_M^H + E_M^K}{2}, \quad E_M^{cp} = \frac{0,06 + 0,08}{2} = 0,07 \text{ В.}$$

Тогда

$$U = 0,008 \cdot 2,5 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 3 \cdot 10^{-2} + 4 + 2 \cdot 200 \cdot 0,07 \approx 152 \text{ В;}$$

$$j_k = \frac{152 - (4 + 2 \cdot 200 \cdot 0,08)}{2500 \cdot 200 \cdot 4 \cdot 10^{-2}} = 0,0058 \text{ А/см}^2;$$

$$v_d = \frac{2,5 \cdot 0,0058^{1/0,67}}{0,03^{1/0,67} \cdot 0,08} = 2,68 \text{ см/с;}$$

$$a_H = 1 \cdot 200 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 2,68 \cdot 10^{-2} \cdot 3600 = 11,6 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Общий расход тока на опреснение воды (формула (2.52) [18])

$$W = \frac{W_3 + W_H}{Q}.$$

Расход тока на опреснение воды (формула (2.50) [18])

$$W_3 = \frac{j_{cp} F_H U m}{1000}.$$

Плотность тока в начале цикла

$$j_H = \frac{152 - (4 + 2 \cdot 200 \cdot 0,06)}{2500 \cdot 200 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 0,0124 \text{ А/см}^2.$$

Плотность тока в среднем за цикл

$$j_{\text{ср}} = \frac{j_{\text{н}} + j_{\text{к}}}{2}, \quad j_{\text{ср}} = \frac{0,0124 + 0,0058}{2} = 0,0153 \text{ А/см}^2;$$

$$W_3 = \frac{0,0153 \cdot 2500 \cdot 152 \cdot 1}{1000} = 5,8 \text{ кВт.}$$

Расход тока на перекачку диллюата и рассола (формула (2.51) [18])

$$W_{\text{п}} = N_{\text{д}}N, \quad W_{\text{п}} = 0,8 \cdot 2 = 1,6 \text{ кВт.}$$

Тогда

$$W = \frac{5,8 + 1,6}{15} = 0,5 \text{ кВт/м}^3.$$

Ответ: $a_{\text{н}} = 11,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $W = 0,5 \text{ кВт/м}^3$.

Задания для самостоятельной работы

1. На судоремонтном предприятии проводится очистка сточных вод от остатков промышленных моющих средств с последующим концентрированием щёлочи с помощью электромембранной установки типа фильтр-пресс с замкнутой циркуляцией раствора по тракту ретанта. Расход сточных вод $Q_{\text{сут}} = 1000 \text{ м}^3/\text{сут}$. Концентрация щёлочи в сточной воде: исходная $\bar{x}_{1\text{н}} = 5\%$ (масс.), в пермеате $\bar{x}_{1\text{н}} = 0,03\%$ (масс.), в ретанте $\bar{x}_{1\text{к}} = 10\%$ (масс.). Удельная производительность мембраны по пермеату $G_0 = 10 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$. Напряжение питающего источника $U = 380 \text{ В}$. Электродное напряжение $E_3 = 4 \text{ В}$. Среднее внутреннее сопротивление одной камеры $R = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$. Плотность тока $j = 0,008 \text{ А/см}^2$. Диаметр проточного отверстия в мембране $d_{\text{пер}} = 0,025 \text{ мм}$. Общая площадь одного мембранного элемента $F_{\text{н}} = 6000 \text{ см}^2$. Определить необходимое число камер разделения в электромембранной установке n .

2. На заводе по производству химических полуфабрикатов проводится очистка щёлочесодержащих сточных вод с последующим концентрированием щёлочи с помощью электромембранной установки типа фильтр-пресс с замкнутой циркуляцией раствора по тракту ретанта. Расход сточных вод $Q_{\text{сут}} = 500 \text{ м}^3/\text{сут}$. Концентрация щёлочи в сточной воде: исходная $\bar{x}_{1\text{н}} = 3\%$ (масс.), в пермеате $\bar{x}_{1\text{н}} = 0,03\%$ (масс.), в ретанте $\bar{x}_{1\text{к}} = 7\%$ (масс.). Удельная производительность мембраны по пермеату $G_0 = 8 \text{ см}^3/\text{см}^2 \cdot \text{мин}$. Напряжение питающего источника $U = 200 \text{ В}$. Электродное напряжение $E_3 = 4 \text{ В}$. Среднее внутреннее сопротивление одной камеры $R = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$. Плотность тока $j = 0,007 \text{ А/см}^2$. Диаметр проточного отверстия в мембране $d_{\text{пер}} = 0,015 \text{ мм}$. Общая площадь од-

ного мембранного элемента $F_n = 2800 \text{ см}^2$. Определить необходимое число камер разделения в электромембранной установке n .

3. В цеху водоподготовки приморского санатория осуществляется опреснение морской воды в количестве $Q_{\text{час}} = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ в электродиализной опреснительной мембранной установке. Расстояние между мембранами (перемычками) $l = 0,12 \text{ см}$. Эквивалентное расстояние между мембранами $l_s = 0,08 \text{ см}$. Ширина прохода воды в камере $B_1 = 30 \text{ см}$. Число парных мембран $n = 50$ шт. Работает один электролизёр. Параметр, зависящий от конструкции камеры типа турбулизатора-сепаратора, $B = 2,5$. Параметр, зависящий от соотношения коэффициентов диффузии растворённых в воде солей и её температуры, $p = 0,67$. Средняя концентрация растворённых солей в опресняемой воде в конце цикла $C = 0,015 \text{ г-экв}$. Электродное напряжение $E_3 = 4 \text{ В}$. Мембранное напряжение в начале цикла $E_M^H = 0,05 \text{ В}$, в конце цикла $E_M^K = 0,09 \text{ В}$. Внутреннее сопротивление одной камеры в начале цикла $R_n = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$, в конце цикла $R_k = 3,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$. Общая площадь одного мембранного элемента $F_n = 3300 \text{ см}^2$. Расчётная плотность тока $I = 0,005 \text{ А/см}^2$. Мощность двигателей рабочих циркуляционных насосов $N_d = 0,9 \text{ кВт}$. Число рабочих циркуляционных насосов $N = 1$ шт. Определить производительность рабочих циркуляционных насосов для перекачки опресняемой воды a_n и рассола и общий расход тока на опреснение воды W .

4. В цеху водоподготовки фармацевтического предприятия осуществляется опреснение морской воды в количестве $Q_{\text{час}} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ в электродиализной опреснительной мембранной установке. Расстояние между мембранами (перемычками) $l = 0,12 \text{ см}$. Эквивалентное расстояние между мембранами $l_s = 0,08 \text{ см}$. Ширина прохода воды в камере $B_1 = 50 \text{ см}$. Число парных мембран $n = 300$ шт. Работают пять электролизёров. Параметр, зависящий от конструкции камеры типа турбулизатора-сепаратора, $B = 2,5$. Параметр, зависящий от соотношения коэффициентов диффузии растворённых в воде солей и её температуры, $p = 0,67$. Средняя концентрация растворённых солей в опресняемой воде в конце цикла $C = 0,05 \text{ г-экв}$. Электродное напряжение $E_3 = 4 \text{ В}$. Мембранное напряжение в начале цикла $E_M^H = 0,03 \text{ В}$, в конце цикла $E_M^K = 0,08 \text{ В}$. Внутреннее сопротивление одной камеры в начале цикла $R_n = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$, в конце цикла $R_k = 5,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$. Общая площадь одного мембранного элемента $F_n = 7000 \text{ см}^2$. Расчётная плотность тока $I = 0,009 \text{ А/см}^2$. Мощность двигателей рабочих циркуляционных насосов $N_d = 1,5 \text{ кВт}$. Число рабочих циркуляционных насосов $N = 5$ шт. Определить производительность рабочих циркуляционных насосов для перекачки опресняемой воды a_n и рассола и общий расход тока на опреснение воды W .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемое учебное пособие полностью соответствует требованиям ФГОС, рабочим программам по дисциплинам «Основы промышленной экологии», «Рациональное водопользование и очистка сточных вод», «Обращение с отходами производства и потребления», «Технологии защиты атмосферы», «Теоретические основы комплексной защиты окружающей среды» и др.

В издании использован практикоориентированный подход, когда процедура расчёта каждого технологического процесса рассматривается для конкретного экологического события.

Важное значение в учебном пособии отводится реализации междисциплинарного подхода.

В итоге, данное учебное пособие по сути предлагаемой тематики может использоваться как для направлений подготовки бакалавров экологического профиля, так и экологических профилей магистров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
2. Проскуряков, В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт. – Л. : Химия, 1977. – 464 с.
3. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – 9-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1981. – 560 с.
4. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды : учебник / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торочешников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1989. – 512 с.
5. Химия : справ. издание / Б. Шретер, К.-Х. Лаутеншлегер, Х. Бибрак и др. ; пер. с нем. – М. : Химия, 1989. – 648 с.
6. Халиуллин, А. К. Введение в промышленную экологию : учебное пособие / А. К. Халиуллин, Б. А. Ульянов. – Иркутск : ИПИ, 1989. – 72 с.
7. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии : учебник / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1984. – 496 с.
8. Охрана окружающей среды : учебное пособие / под ред. С. В. Белова. – М. : Высш. школа, 1983. – 264 с.
9. Бертокс, П. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений / П. Бертокс, Д. Радд. – М. : Мир, 1980. – 608 с.
10. Ввозная, Н. Ф. Химия воды и микробиология : учебное пособие / Н. Ф. Ввозная. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. школа, 1979. – 340 с.
11. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. ; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.
12. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – М. : Химия, 1977. – 368 с.
13. Очистка сточных вод (примеры расчётов) : учебное пособие / М. П. Лапицкая, Л. И. Зуева, Н. М. Баласскул, Л. В. Кулешова. – Мн. : Высшая школа, 1983. – 255 с.
14. Жидко, Е. А. Теоретические основы проектирования и конструкции жидкостных пылеулавливающих устройств / Е. А. Жидко, В. В. Колотушкин, Э. В. Соловьева // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 2. – С. 8 – 12.

15. Очистка производственных сточных вод : учебное пособие / С. В. Яковлев, Я. А. Карелин, Ю. М. Ласков, Ю. В. Воронов. – М. : Стройиздат, 1979. – 320 с.

16. Козачек, А. В. Теоретические основы защиты окружающей среды. Ч. I. Седиментация и фильтрация : учебное пособие / А. В. Козачек. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 88 с.

17. Абоносимов, О. А. К вопросу о методике расчёта электро-мембранных аппаратов / О. А. Абоносимов, М. А. Рябинский, А. С. Лазарев, Г. С. Кормильцин // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2009. – Т. 14, вып. 2. – С. 468–469.

18. Жилинский, В. В. Электрохимическая очистка сточных вод и водоподготовка : конспект лекций / В. В. Жилинский. – Мн. : Беларус. гос. технол. ун-т, 2013. – 191 с.

19. Кожинов, В. Ф. Очистка питьевой и технической воды. Примеры и расчёты / В. Ф. Кожинов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1971. – 304 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Классификация и образование загрязнений	4
2. Седиментационные процессы защиты окружающей среды ...	16
2.1. Общие основы седиментации	16
2.2. Гравитационное стеснённое отстаивание	22
2.3. Инерционное осаждение	28
2.4. Всплывание	32
2.5. Псевдооживление	36
2.6. Электрическое осаждение	42
2.7. Магнитное осаждение	47
3. Фильтрационные процессы защиты окружающей среды	53
3.1. Общие основы фильтрации	53
3.2. Фильтрование при разности давлений	59
3.3. Центробежное фильтрование	66
3.4. Промывка (продувка)	71
3.5. Глубинная фильтрация	77
3.6. Поверхностная фильтрация (процеживание)	83
3.7. Грохочение	87
3.8. Пенная фильтрация	91
3.9. Мембранная фильтрация	97
3.10. Электромембранная фильтрация	109
Заключение	116
Список литературы	117

Учебное издание

КОЗАЧЕК Артемий Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАЩИТЫ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

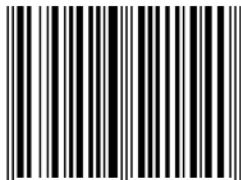
Часть I

Практикум

Редактор И. В. Калистратова
Компьютерное макетирование М. А. Евсейчевой

Подписано в печать 24.12.2019.
Дата выхода в свет 30.01.2020.
Формат 60 × 84 / 16. 6,97 усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ № 113

ISBN 978-5-8265-2154-0



Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14
Тел. 8(4752) 63-81-08;
E-mail: izdatelstvo@admin.tstu.ru

Отпечатано в Типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А
Тел. 8(4752) 63-07-46
E-mail: tipo_tstu68@mail.ru