

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Г.М. Бутов, О.А. Тишин, Е.В. Климова, С.В. Орлов

Процессы и аппараты защиты окружающей среды

Электронное учебно-методическое пособие



Волжский
2018

УДК 66.02(07)
ББК 34.7я73
П 845

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор
кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств»
филиала Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский
университет «МЭИ»» в г. Волжском,
Кульков В.Г.,
кандидат технических наук, инженер-конструктор
ООО «КОМЕД» в г. Волжском,
Харитонов В.Н.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Бутов, Г. М.

Процессы и аппараты защиты окружающей среды [Электронный ресурс] : учебно-методическое пособие / Г.М. Бутов, О.А. Тишин, Е.В. Климова, С.В. Орлов ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Электрон. текстовые дан. (1 файл: 866 КБ). – Волжский, 2018. – Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-2999-8

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с учебным планом и рабочей программой курса процессы и аппараты защиты окружающей среды и предназначено для самостоятельной работы студентов при подготовке к лабораторным занятиям, экзамену.

В пособии рассмотрены вопросы посвященные исследованию процесса химического обезвреживания газовых выбросов, фильтрования тонкодисперсной суспензии, коагуляции (флокуляции) и отстаивания суспензий, а также процесса центробежного разделения суспензии.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направления 18.03.02 «Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии».

Ил. 10, табл. 4, библиограф.: 8 назв.

ISBN 978-5-9948-2999-8

© Волгоградский государственный
технический университет, 2018
© Волжский политехнический
институт, 2018

Содержание

| | |
|------------------------------|----|
| Введение | 4 |
| Лабораторная работа №1 | 5 |
| Лабораторная работа №2 | 13 |
| Лабораторная работа №3 | 21 |
| Лабораторная работа №4 | 26 |
| Список литературы | 31 |
| Приложение А | 32 |
| Приложение Б | 34 |
| Приложение В | 35 |
| Приложение Г | 36 |
| Приложение Д | 37 |
| Приложение Е | 38 |
| Приложение Ж | 39 |
| Приложение З | 40 |
| Приложение И | 41 |

Введение

Основной целью лабораторных занятий является ознакомление с инженерными методами расчета теплотехнических систем. В процессе выполнения лабораторных работ студенты получают навыки в постановке задачи, классификации рассматриваемых явлений, выборе метода решения, анализе полученных результатов.

Таблица 1 – Перечень лабораторных работ по курсу процессы и аппараты защиты окружающей среды

Таблица 1

| Но- мер | Наименование лабораторной работы | Вид |
|------------|---|--------------|
| 1 | Исследование процесса химического обезвреживания газовых выбросов | расчетная |
| 2 | Исследование процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии | практическая |
| 3 | Исследование процесса коагуляции (флокуляции) и отстаивания суспензий | практическая |
| 4 | Исследование центробежного разделения суспензии | практическая |

В пособии изложен теоретический и практический материал, необходимый для подготовки и выполнения лабораторной работы. Лабораторная работа выполняется с использованием компьютерной модели процесса химической абсорбции, разработанной в среде Mathcad.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО
ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ**

1.1 Цель работы

Изучение процесса хемосорбции газовых примесей с использованием математической модели.

1.2 Содержание работы

- 1) Ознакомиться с механизмом хемосорбции и возможностью его представления с помощью математического описания.
- 2) Ознакомиться с математической моделью хемосорбции, протекающей в насадочном абсорбере, выявить варьируемые параметры.
- 3) Провести вычислительный эксперимент на математической модели, подставив необходимые значения варьируемых параметров.

1.3 Теоретическая часть

1.3.1 Основные понятия и термины

В работе используются следующие понятия и термины: абсорбент, поглотитель, физическая абсорбция, химическая абсорбция, хемосорбция, насадочный абсорбер.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо уяснить содержание этих терминов и понятий по материалу, изложенному в настоящих методических указаниях.

1.3.2 Основные положения

1.3.2.1 Понятие хемосорбции

Процесс, сопровождающийся химической реакцией между поглощаемым компонентом и абсорбентом, называют *химической абсорбцией* или *хемосорбцией*. При хемосорбции абсорбируемый компонент вступает в химическую реакцию с поглотителем, образуя новые химические соединения в жидкой фазе.

При необратимой реакции равновесное давление компонента над раствором ничтожно мало и возможно полное его поглощение. При обратимой реакции над раствором существует заметное давление компонента, хотя и меньшее, чем при физической абсорбции. Большинство реакций при хемосорбции, протекающих при очистке, являются экзотермическими и обратимыми, поэтому при повышении температуры раствора образующееся химическое соединение разлагается с выделением исходных компонентов.

Растворимость газа при хемосорбции зависит от физической растворимости газа, константы равновесия химической реакции, стехиометрических соотношений при реакции и других факторов. Характерная особенность растворимости газов в хемосорбентах заключается в неравномерном

росте растворимости при увеличении давления: чем выше давление, тем медленнее (по мере расхода хемосорбента) повышается растворимость.

Хемосорбция выгодна при небольшой концентрации загрязнителя, является одним из распространенных способов очистки отходящих газов от оксидов азота. При проектировании абсорберов необходимо уделять внимание организации контакта газового потока с поглотителем. Чем больше поверхность раздела фаз, турбулентность потоков и диффузия, тем эффективнее процесс.

Организация контакта газового потока с жидким поглотителем осуществляется пропуском газа через насадочную колонну, распылением жидкости, барботированием и другими способами.

Газ называется хорошо растворимым, если его растворимость при $t=0^{\circ}\text{C}$ и $P=100$ кПа составляет сотни граммов на 1 кг растворителя.

При абсорбции, сопровождаемой химической реакцией в жидкой фазе, абсорбируемый компонент вступает в реакцию с поглотителем, возрастает градиент концентрации около поверхности раздела, скорость поглощения увеличивается.

Предполагается, что движущая сила процесса хемосорбции равна движущей силе физической абсорбции, а ускорение процесса массообмена химической реакцией учитывается поправкой к коэффициенту массопередачи в жидкой фазе, определенному по критериальным зависимостям для физической абсорбции.

Коэффициент ускорения абсорбции в жидкой фазе при протекании химической реакции равен:

$$\chi = \beta'_{жс} / \beta_{жс},$$

где $\beta_{жс}$, $\beta'_{жс}$ – коэффициенты массоотдачи в жидкой фазе для физической абсорбции и хемосорбции.

Связь коэффициента массопередачи с коэффициентами массоотдачи при хемосорбции определяется уравнениями:

$$\begin{aligned} 1/K'_2 &= 1/\beta_2 + m/\beta'_{жс} ; \\ 1/K'_{жс} &= 1/(m \cdot \beta_2) + 1/\beta'_{жс} . \end{aligned}$$

Коэффициент ускорения зависит от скорости химической реакции и степени турбулизации жидкости. По мере протекания хемосорбции коэффициент массоотдачи в жидкой фазе $\beta'_{жс}$ уменьшается, что затрудняет вычисление движущей силы.

Для хемосорбционной очистки требуется в несколько раз меньшая поверхность массообмена по сравнению с поверхностью массообмена для физической абсорбции, что соответствует кратному ускорению процесса.

1.3.2.2 Хемосорберы

Для хемосорбции газовых загрязнителей наиболее подходящими считаются насадочные и тарельчатые колонны. В насадочных колоннах обеспечивается лучший контакт обрабатываемых газов с абсорбентом, чем в

полых распылителях, благодаря чему интенсифицируется процесс массопереноса и уменьшаются габариты очистных устройств.

Некоторые распространенные типы насадок показаны на рисунке 1. Максимальную поверхность контакта на единицу объема образуют седлообразные насадки «Инталокс» (а) и Берля (б). Они имеют и минимальное гидравлическое сопротивление, но стоимость их выше, чем колец. Из кольцевых насадок наилучший контакт создают кольца Паля (в), но они сложны в изготовлении и дороже колец Лессига (г) и Рашига (д). Хордовые деревянные насадки (е) имеют минимальную удельную поверхность и стоимость. Технические характеристики некоторых насадок приведены в приложении А.

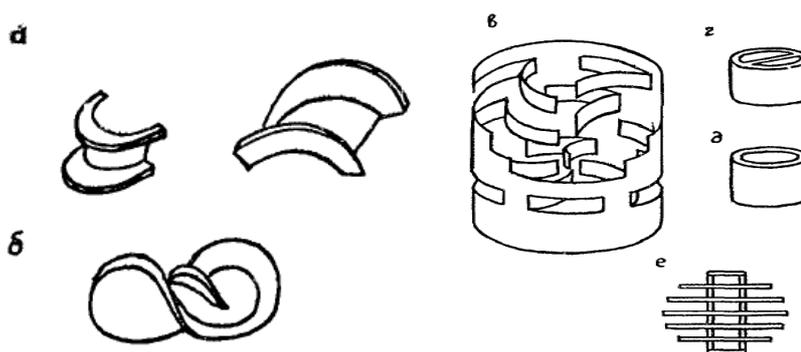


Рис. 1. Виды насадок

1.4 Описание объекта моделирования

Моделируемым объектом является насадочный абсорбер (см. рисунок 2).

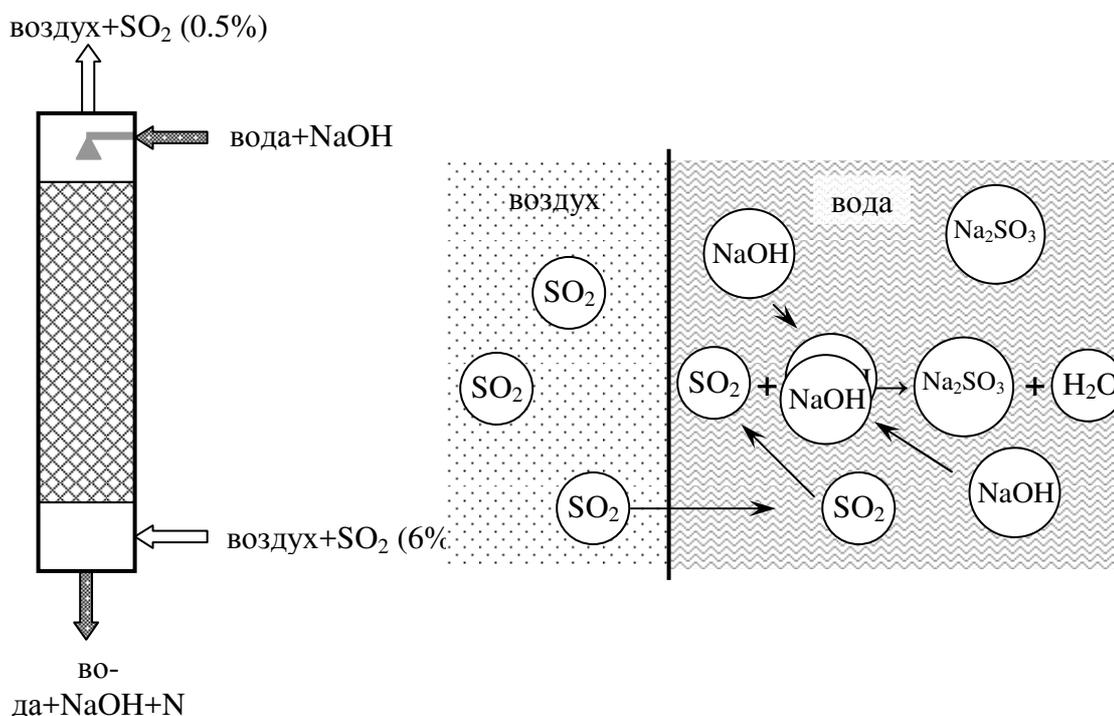


Рис. 2. Насадочный абсорбер для отчистки воздуха от SO₂

В примере к лабораторной работе используются в качестве насадки кольца Рашига (навал 50 мм). Характеристики насадки смотри в приложении А. В нижнюю часть колонны подается для отчистки воздух с диоксидом серы, в верхнюю часть колонны – водный раствор NaOH. Оксид серы абсорбируется водой и в жидкой фазе реагирует с гидроксидом натрия, образуя соль и воду.

Из нижней части колонны отводят водный раствор NaOH и Na₂SO₃, из верхней – отчищенный воздух.

При моделировании приняты следующие допущения: считается, что насадка хорошо смачивается во всем объеме; воздух распределяется равномерно по всему объему слоя насадки.

Для проведения процесса абсорбции диоксида серы используют скрубберы с высокой пропускной способностью по газу, низкое гидравлическое сопротивление (до 3 кПа).

1.4.1 Математическая модель насадочного хемосорбера

Насадочная колонна представляет собой объект, в котором противоток движутся жидкая и газовая фазы. Газовая снизу вверх, жидкая сверху вниз. Примем, в первом приближении, что обе фазы движутся в режиме идеального вытеснения. Уравнения для расчета изменения концентрации поглощаемого компонента в газовой фазе имеет вид:

$$\frac{dC_A}{dh} = -\frac{\beta_{xF} E_i x_A^*}{v_2} \cdot a.$$

Уравнение для расчета концентрации реагента в жидкой фазе имеет вид:

$$\frac{dC_B}{dh} = -Z \frac{\beta_{xF} E_i x_A^*}{v_{ж}} \cdot a.$$

Равновесная концентрация поглощаемого вещества в жидкой фазе равна:

$$x_{A_i}^* = \frac{P}{E} y_{A_i}.$$

Соотношение между мольными долями и объемной концентрацией вещества

$$x(y) = \frac{C_x M_{см}}{\rho_{см} + C_x (M_x - M_H)} = \frac{C_x M_{см}}{\rho_{см}}.$$

Местный коэффициент ускорения процесса сорбции равен:

$$E_i = 1 + \frac{D_B C_{B0}}{z D_A C_{A_i}^*}.$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе определяется по следующей процедуре. Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе β_x находят из обобщенного уравнения для неупорядоченных насадок:

$$Sh'_x = 0,0021 \cdot Re_x^{0,75} Sc_x^{0,5},$$

где $Sh'_x = \frac{\beta_{xF} \delta_{пр}}{D_x}$ - диффузионный коэффициент Нуссельта, число

Шервуда.

Отсюда:

$$\beta_{xF} = 0,0021 \cdot \frac{D_x}{\delta_{пр}} \cdot Re_x^{0,75} Sc_x^{0,5}.$$

Средний коэффициент диффузии вещества в растворах:

$$D_x = 7,4 \cdot 10^{-12} \cdot (\beta M)^{0,5} \cdot \frac{T}{\mu_x v_{SO_2}^{0,6}}.$$

где M – мольная масса воды, кг/моль;

T – температура воды, К;

μ_x -вязкость воды, мПа;

v_{SO_2} - мольный объем диоксида серы, см³/моль;

β - параметр, учитывающий ассоциацию молекул (для воды $\beta = 2,6$).

Приведенная толщина стекающей пленки жидкости:

$$\delta_{пр} = \left[\frac{\mu_x^2}{\rho_x^2 g} \right]^{1/3}.$$

Модифицированное число Рейнольдса для стекающей по насадке пленки жидкости:

$$Re_x = \frac{4U\rho_x}{a\mu_x}.$$

Число Шмидта для жидкости:

$$Sc'_x = \frac{\mu_x}{\rho_x D_x}.$$

Выразим β_x в выбранной размерности:

$$\beta'_x = \beta_x \cdot (\rho_x - c_{хсп}).$$

где $c_{хсп} = \frac{c'_{хсп} \cdot \rho_x}{(c'_{хсп} + 1)}$ – средняя объемная концентрация в поглотителе, кг

$SO_2 / (м^3 \text{ см})$.

Скорость движения жидкой фазы определяется из условия смачивания всей поверхности насадки (коэффициент смачиваемости насадки равен единице). Минимальная плотность орошения, при которой обеспечивается полная смачиваемость поверхности насадки, равна:

$$U_{\psi_{a=1}} = \frac{ap}{3600(1-q)} = v_{ж}.$$

Недостаточное орошение элементов насадки ведет к недоиспользованию поверхности ее контакта. Значительный избыток жидкости может вызвать частичное затопление насадки, что также ведет к ухудшению контакта фаз на поверхности насадочных элементов. Точный расчет пределов плотности орошения не возможен. Ориентировочно минимальную плотность орошения ρ_m , м³/ч на 1 м² поверхности насадки можно принять как $0.12 \cdot f_v$, где f_v – удельная поверхность насадки, м²/м³, а максимальную плотность орошения – в 4..6 раз выше минимальной. Существуют и другие более сложные соотношения.

При такой скорости движения жидкости смоченная поверхность является активной. Поскольку массовые расходы жидкой и газовой фаз равны, соответственно:

$$\begin{aligned} q_{ж} &= v_{ж} \rho_{ж} F_k, \\ q_{г} &= v_{г} \rho_{г} F_k. \end{aligned}$$

После подстановки значений расходов газовой и жидкой фаз в уравнение для расчета скорости движения газовой фазы в колонне:

$$\lg \left[\frac{v_{пр}^2 \rho_y}{g d_3 \varepsilon^2 \rho_x} \left(\frac{\mu_x}{\mu_b} \right)^{0,16} \right] = A - B \left(\frac{v_{пр}}{v_{ж}} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,375}.$$

Решая это уравнение относительно предельной скорости движения газа определяем ее значение. После определения скорости определяем диаметр аппарата:

$$d = \sqrt{\frac{4q_{v_{г}}}{\pi v_{г}}} = \sqrt{\frac{4q_{v_{0г}} \cdot \frac{T}{T_0} \cdot \frac{P_0}{P}}{\pi v}}.$$

1.4.1.1 Гидравлическое сопротивление абсорбера

Гидравлическое сопротивление ΔP обуславливает энергетические затраты на транспортировку газового потока через абсорбер. Величину ΔP рассчитывают по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_c \cdot 10^{bU}.$$

где ΔP_c - гидравлическое сопротивление сухой (не орошаемой жидкостью) насадки, Па,

U - плотность орошения, м³ / (м² с),

b - характеристика насадки.

Гидравлическое сопротивление сухой насадки ΔP_c определяют по уравнению:

$$\Delta P_c = \lambda \cdot \frac{H}{d_3} \cdot \frac{\omega_0^2}{2} \cdot \rho_y,$$

где λ - коэффициент сопротивления:

$$\lambda = \frac{6,64}{\text{Re}_y^{0,375}}.$$

1.5 Методика проведения эксперимента и обработка результатов

1.5.1 Методика проведения экспериментов

Для выполнения лабораторной работы необходимо выполнить следующие действия:

- 1) задать исходные данные в математической модели в соответствии с вариантом;
- 2) определить по данным из таблиц (см. приложения) следующие параметры: параметры насадки, плотность и динамический коэффициент вязкости воздуха и воды, процентная массовая доля SO_2 в воде соответственная парциальному давлению SO_2 в воздухе, диаметр колонны;
- 3) определить характеристики хемосорбера по результатам математического моделирования;
- 4) задать новые исходные данные: температура воздуха и воды $20\text{ }^\circ\text{C}$; объемный расход воздуха $6\text{ м}^3/\text{с}$; конечная концентрация NaOH в воде $0,8\text{ кмоль}/\text{м}^3$; начальная мольная концентрация SO_2 в воздухе $0,0029\text{ кмоль}/\text{м}^3$;
- 5) повторить пункт 2;
- 6) определить при какой высоте слоя насадки на выходе будет $0.3\div 0.5\%$ (объемн.) SO_2 в воздухе.

1.5.2 Обработка опытных данных

Рассчитать количество колонн, ярусов и высоту насадочной части скруббера в соответствии с ниже изложенной информацией.

Обычно высота скрубберов не превышает $40\div 50\text{ м}$. Во избежание нагрузок на нижние слои насадки ее в колонне ярусами по $20\div 25$ решеток в каждом. Каждый ярус устанавливают на самостоятельные поддерживающие опоры. Расстояние между ярусами насадки принять $0,4\text{ м}$.

1.6 Содержание отчета

Отчет по выполненной работе должен содержать:

- 1) цель лабораторной работы;
- 2) схему насадочного абсорбера с материальными потоками;
- 3) исходные данные для расчета по варианту;
- 4) формулы, которые учитывают химическую реакцию, протекающую в абсорбенте, описание параметров;
- 5) результаты расчета по варианту и график зависимости концентрации диоксида серы по высоте скруббера с учетом хемосорбции и без нее;
- 6) исходные данные для расчета из общего задания;
- 7) сравнительную таблицу входных и выходных параметров модели хемосорбера для разных видов насадок;

8) выводы по работе.

1.7 Варианты заданий

| № варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|----------------------------|-------------------|------------------------|--------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Температура воды, °С | 20 | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 | 20 |
| Температура воздуха, °С | 20 | 30 | 40 | 20 | 30 | 40 | 20 |
| Расход воздуха, м ³ /с | 5 | 6 | 7 | 6,5 | 5,5 | 7,5 | 8 |
| Конечная концентрация NaOH, кмоль/м ³ | 0,75 | 0,83 | 0,95 | 0,7 | 0,9 | 0,68 | 0,72 |
| Начальная концентрация SO ₂ в воздухе, кмоль/м ³ | 0,002 | 0,0025 | 0,003 | 0,0031 | 0,0027 | 0,0032 | 0,0022 |
| Насадка | Кольца Рашига 25 мм внавал | Седла Берля 25 мм | Седла «Инталокс» 25 мм | Кольца Палля 50 мм | Седла «Инталокс» 50 мм | Кольца Рашига 50 мм в уклад | Кольца Рашига 80 мм в уклад |

1.8 Контрольные вопросы

- 1) Понятие хемосорбции.
- 2) От чего зависит растворимость газа при хемосорбции зависит?
- 3) Движущая сила процесса хемосорбции
- 4) Возможно ли полное поглощение абсорбата при хемосорбции?
- 5) Виды хемосорбции
- 6) От чего зависит коэффициент ускорения абсорбции при хемосорбции?
- 7) Связь коэффициента массопередачи с коэффициентами массоотдачи при хемосорбции.
- 8) Увеличивается ли растворимость газа при хемосорбции?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ
ТОНКОДИСПЕРСНОЙ СУСПЕНЗИИ**

2.1 Цель работы

Определение констант фильтрации, удельного сопротивления осадка и сопротивления фильтровальной перегородки.

2.2 Содержание работы

- 1) Ознакомиться с закономерностями фильтрации с образованием слоя несжимаемого осадка.
- 2) Изучить методику определения констант фильтрации.
- 3) Провести опыты по разделению модельных суспензий.
- 4) Построить по опытным данным график зависимости $\tau/g=f(g)$ и определить значения констант фильтрации, удельное сопротивление осадка и сопротивление фильтровальной перегородки.

2.3 Теоретическая часть

2.3.1 Основные понятия и термины

В работе используются следующие понятия и термины:

суспензия, фильтрация, фильтр, фильтровальная перегородка, осадок, фильтрат, схема устройства и принцип работы простейшего фильтра; способ создания разности давления при фильтрации; материалы, применяющиеся для изготовления фильтровальных перегородок; фильтрация с образованием слоя осадка, сжимаемые и несжимаемые осадки, фильтрация с закупориванием пор, промежуточное фильтрация, фильтрация с применением вспомогательных веществ; скорость фильтрации, фильтрация при постоянной разности давления, при постоянной скорости и при переменных значениях давления и скорости; удельный объем фильтрата, сопротивление осадка и перегородки, удельное сопротивление осадка, константы фильтрации.

Перед выполнением лабораторной работы необходимо уяснить содержание этих терминов и понятий.

2.3.2 Основные положения

В тех случаях, когда при разделении суспензий недопустимы потери жидкости с осадком или взвешенные твердые частицы весьма плохо оседают, или же необходимо выделить твердую фазу в виде осадка с некоторым минимальным содержанием влаги, метод отстаивания и декантации неприменим. В этих случаях суспензии разделяют при помощи фильтрации.

Процесс фильтрации основан на задержании твердых взвешенных частиц пористыми перегородками, способными пропускать только жидкость и задерживать частицы твердой фазы. В результате непосредственного контакта суспензии с поверхностью пористой перегородки и разного дав-

ления до и после перегородки жидкая фаза проходит через поры перегородки и собирается в виде освобожденного от твердых частиц фильтрата, а твердые частицы задерживаются на поверхности перегородки, образуя слой осадка, который затем удаляется.

Фильтрация находит в настоящее время широкое применение в технике как универсальный метод разделения суспензий, начиная от самых грубых и кончая тонкими мутями, и используется даже для разделения некоторых коллоидных растворов; в последнем случае необходим соответствующий фильтрующий материал. При фильтрации жидкая фаза должна преодолеть гидравлическое сопротивление, оказываемое фильтрующей перегородкой току жидкости. Однако величина пор фильтрующей перегородки и ее сопротивление имеют значение только в начальный момент процесса, так как в дальнейшем на поверхности фильтрующей перегородки постепенно отлагается осадок. Этот увеличивающийся по мере протекания процесса слой осадка обычно используют как фильтрующую среду и стремятся уменьшить его гидравлическое сопротивление, что достигается путем периодического или непрерывного удаления большей части осадка с фильтрующей перегородки, иногда с последующей промывкой поверхности перегородки растворителями.

Вакуум-фильтр, аппарат для разделения суспензий, то есть жидкостей, содержащих твердые частицы во взвешенном состоянии. Разделение происходит в результате разности давлений, создаваемой вакуум-насосом, над фильтрующей перегородкой и под ней. Известны вакуум-фильтры периодического (рис. 3) и непрерывного (рис. 4) действия.

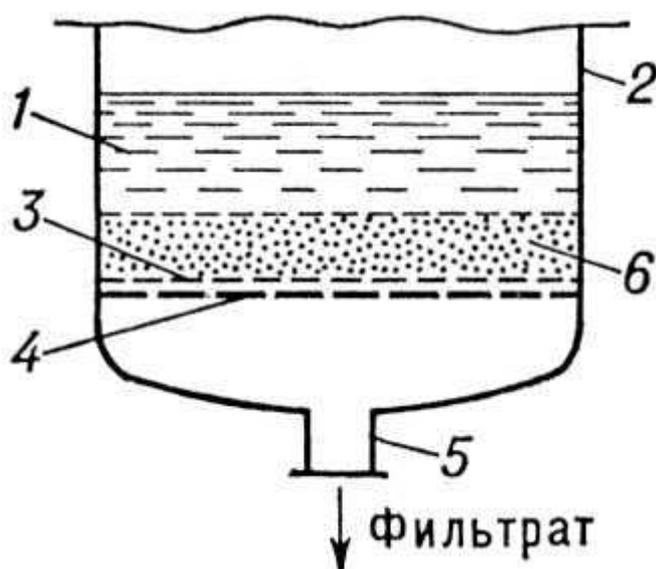


Рис. 3. Вакуум-фильтр периодического действия: 1 - суспензия; 2 - резервуар; 3 - фильтрующая поверхность (ткань, сетка, керамические плитки); 4 - решетка; 5 - штуцер, соединяющийся со сборником фильтрата и вакуум-насосом; 6 - осадок.

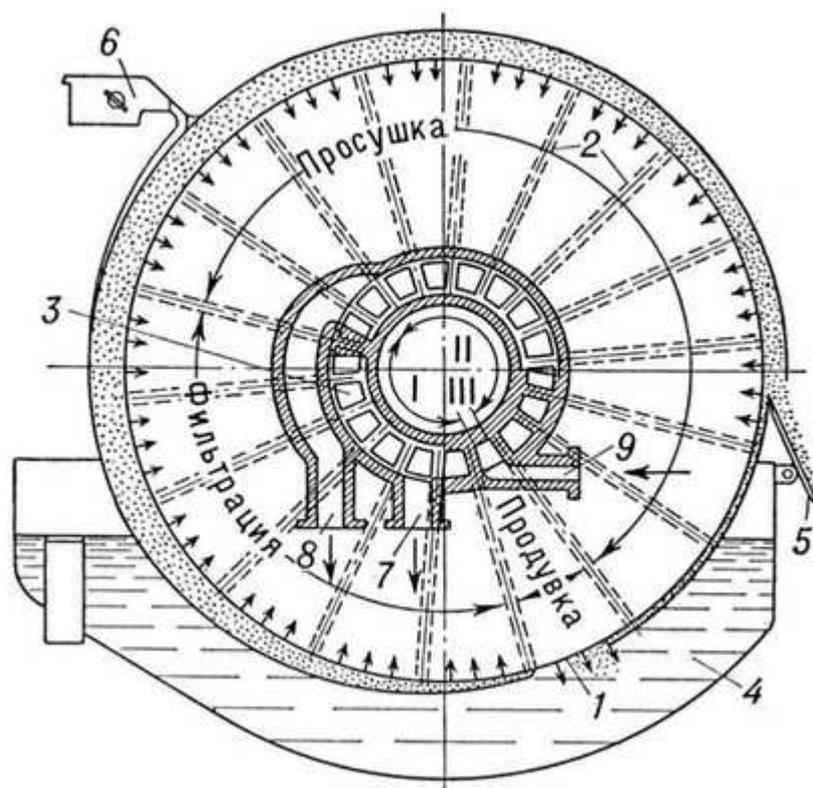


Рис. 4. Барабанный вакуум-фильтр непрерывного действия: 1 - барабан; 2 - перегородки; 3 - распределительная головка (золотниковый механизм); 4 - корыто; 5 - нож для срезания осадка; 6 - распределитель воды для промывания осадка; 7, 8- трубы для откачки соответственно отфильтрованной жидкости и промывной воды; 9 - труба для подачи сжатого воздуха.

Последний представляет собой горизонтальный вращающийся барабан, который изнутри разделён радиальными герметичными перегородками на отдельные ячейки, соединённые трубками с распределительной головкой. По мере вращения барабана в ячейках создаётся вакуум или избыточное давление. При вращении барабан проходит зону фильтрации, где жидкость засасывается в барабан, а твёрдые частицы оседают на фильтрующей ткани. После промывания осадка водой барабан входит в зону сушки, где через осадок просасывается воздух, затем в зону удаления осадка. Здесь изнутри барабана подаётся сжатый воздух, а осадок с поверхности барабана срезается ножом. Известны также дисковые, ленточные, тарельчатые, карусельные и др. вакуум-фильтры непрерывного действия. Вакуум-фильтры широко применяют в химической и др. отраслях промышленности.

2.4 Описание лабораторной установки

Установка для проведения лабораторных исследований, процесса фильтрования (рис. 5) состоит из погружного элемента вакуум-фильтра 1, емкости для суспензии 2 с мешалкой 3, ресивера 9, вакуум-насоса 10, мерной емкости для сбора фильтрата 7 и вакуумметра 6. Отдельные части установки соединены между собой вакуумными резиновыми трубками, как показано на рис. 5. Для управления работой установки служат краны 5 и 8.

Кран 11 служит для слива фильтрата из мерной емкости 7 после окончания работы. Мешалка 3 предназначена для перемешивания суспензии с целью предотвращения осаждения твердых частиц и образования осадка на дне емкости. Температура суспензии определяется с помощью термометра 4.

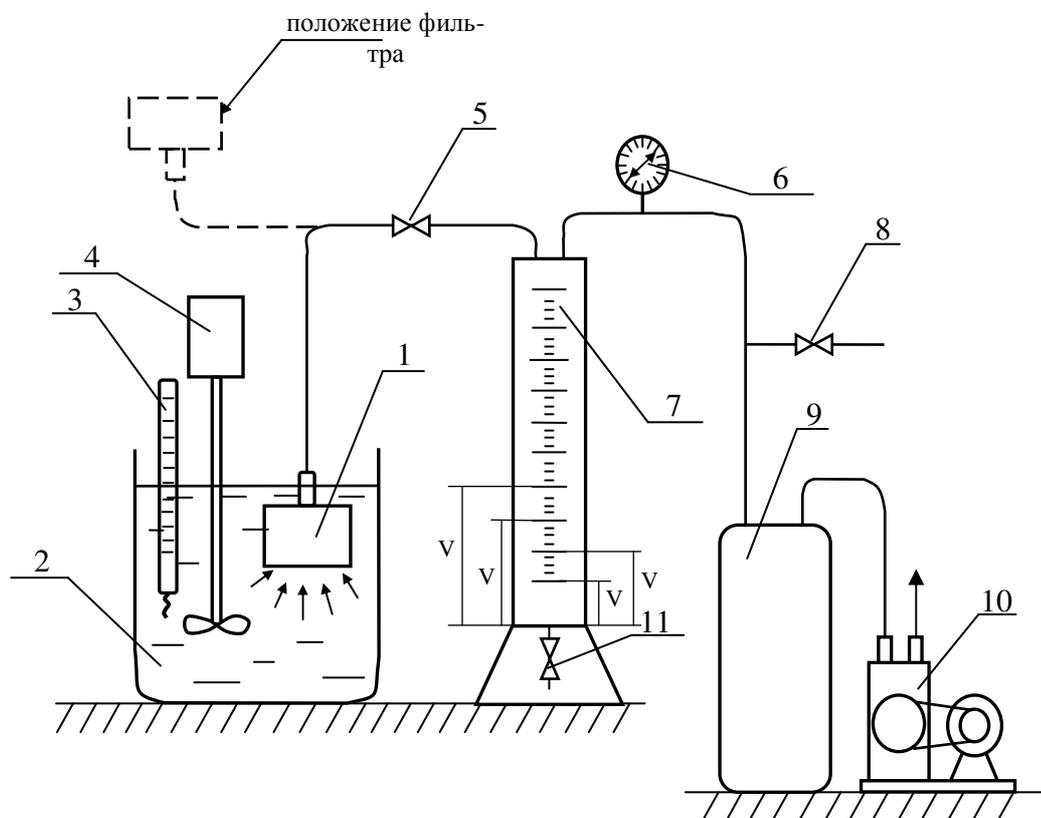


Рис. 5. Схема установки: 1 – элемент вакуум-фильтра; 2 – емкость, 3 – мешалка; 4 – термометр; 5, 8, 11 – краны; 6 – вакуумметр; 7 – мерная емкость для сбора фильтрата; 9 – ресивер; 10 – вакуум-насос.

Элемент вакуум-фильтра (рис. 6.) состоит из цилиндрического корпуса 1, съемной решетки 2, нажимной крышки 3 и фильтровальной перегородки 4, в качестве которой используется фильтровальная ткань.

С помощью вакуумной резиновой трубки 5 элемент вакуум-фильтра сообщается с емкостью для сбора фильтрата.

Перед началом работы внешним осмотром убедиться в исправном состоянии всех элементов установки, проверить надежность крепления резиновых шлангов на штуцерах. Для предотвращения разбрызгивания жидкости мешалкой ее лопасти должны быть погружены в жидкость, но не касаться дна. Во время работы мешалки запрещается касаться ее вала.

До начала опыта получить инструктаж от лаборанта о порядке включения и выключения мешалки и вакуум-насоса и в присутствии лаборанта сделать их пробные включения и выключения.

К работе приступить только после получения на это разрешения от лаборанта.

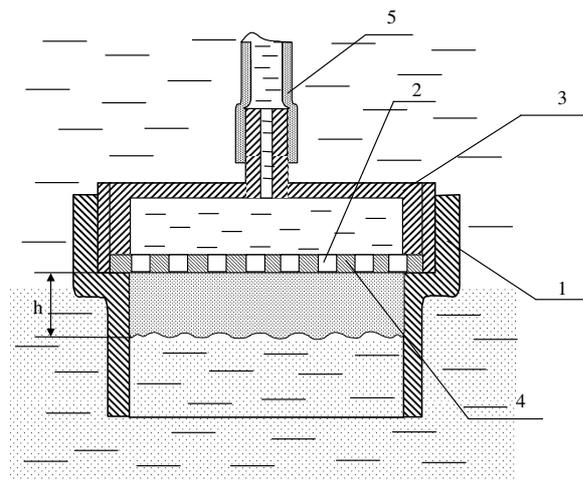


Рис. 6. Элемент вакуум-фильтра: 1- корпус; 2 - решетка; 3- крышка; 4- фильтровальная перегородка; 5-резиновая трубка

2.5 Методика проведения эксперимента и обработка результатов

Экспериментальное изучение разделения суспензии рекомендуется проводить в следующем порядке.

- 1) Залить суспензию в емкость 2 (см. рис. 5.) и включить мешалку 3.
- 2) Погрузить элемент вакуум-фильтра в емкость с суспензией, как это показано на рис. 5, закрыть краны 5, 6, 11 и включить вакуум-насос.
- 3) Медленно открывая кран 8, установить заданное преподавателем значение вакуума, контролируя его величину по вакуумметру 6.
- 4) Открыв кран 5, одновременно включить секундомер. По мере накопления в мерной емкости (см. рис. 5) объемов фильтрата $V_1, V_2, V_3, \dots, V_i$, не останавливая секундомера, замерить соответствующее им время фильтрования $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_i$. Окончание фильтрования определяется замедленным выходом фильтрата. По окончании фильтрования закрыть кран 5 и выключить секундомер, записав время продолжительности процесса фильтрования и объем фильтрата, собранного в мерной емкости. Полученные замеры времени и объемы фильтрата занести в отчетную таблицу 2, при этом значения объемов записываются в графу предварительных замеров.

Таблица 2

| № п.п. | Время замера τ , с | Объем фильтрата | | Удельный объем фильтрата q , м | $\frac{\tau}{q}$, $\frac{с}{м}$ | |
|--------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------|--|-------------------------------------|----------------|
| | | предварительные замеры H , мм | окончательные замеры | | | |
| | | | H , мм | | | V , $м^3$ |
| | | | | | | |

5) Извлечь из емкости элемент вакуум-фильтра, повернуть его поверхностью фильтрования вверх и поднять над мерной емкостью так, как это показано пунктиром на рис. 5, после чего открыть кран 5. С этого момента начинается второй этап процесса фильтрования-продувки и сушка слоя осадка. Когда поверхность осадка потеряет влажный блеск и перестанет изменять свой вид, закончить продувку и сушку осадка, для чего следует выключить вакуум-насос.

6) Во время продувки и сушки осадка из элемента вакуум-фильтра и трубки, соединяющей его с мерной емкостью, в последнюю сольется накопившийся там фильтрат. Необходимо измерить объем этого фильтрата и прибавить по всем объемам, записанным в отчетной таблице в графе предварительных замеров, записав полученные суммы в графу окончательных замеров.

Замерить температуру суспензии, диаметр фильтрующей поверхности и толщину слоя осадка. Толщину слоя осадка измеряют торцом металлической линейки, деления которой начинаются от края.

На основании данных об окончательных замерах объемов фильтрата рассчитать значения удельных объемов фильтрата как

$$g_i = \frac{V_i}{F}$$

где V_i - объемы фильтрата, полученные за время τ_i ;

$F = \frac{\pi D^2}{4}$ - площадь поверхности фильтрования;

D — диаметр фильтрующей поверхности элемента вакуум-фильтра.

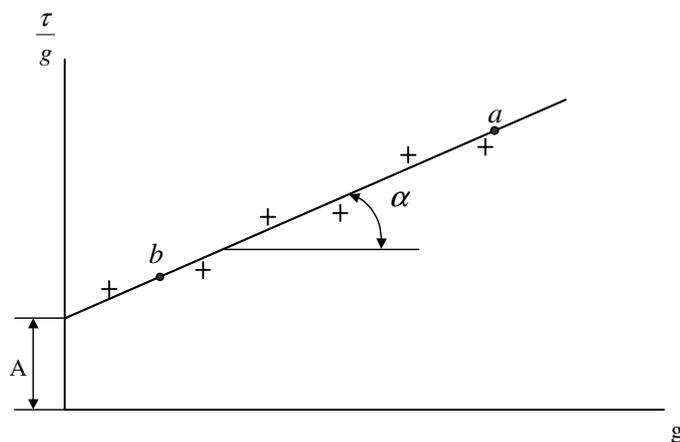


Рис. 7. График определения констант фильтрования

Вычислить значения отношений τ_1/g_1 и занести их в отчетную таблицу.

На основании полученных данных в системе координат $\frac{\tau}{g} - g$ нести точки, через которые провести прямую так, чтобы они равномерно располагались по обе стороны прямой (рис. 7).

По графику определить для прямой величину отрезка A и тангенс угла наклона α . Значение тангенса угла наклона следует определить через отношение размерных отрезков как

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\left(\frac{\tau}{q_i}\right) - \left(\frac{\tau}{q_{i-1}}\right)}{q_i - q_{i-1}} = \frac{1}{K}$$

где $(\tau/g)_a$ и g_a , $(\tau/g)_b$ и g_b – координаты двух точек «а» и «в», произвольно выбранных на прямой, как это показано на рис. 7. Найденное значение тангенса угла наклона прямой является размерной величиной, так как определяется через отношение величин с разной размерностью.

Зная величину $\operatorname{tg} \alpha$ и отрезка A , вычислить значения констант фильтрования K и C по формуле

$$K = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha} \qquad C = \frac{A \cdot K}{2}$$

По формулам определить величину удельного сопротивления осадка r и фильтровальной перегородки $R_{\phi n}$.

$$r = \frac{2 \cdot \Delta P}{K \cdot \mu_{\phi} \cdot x} \qquad R_{\phi n} = Cr = 2 \frac{C \cdot \Delta P}{K \cdot \mu_{\phi} \cdot x}$$

Рассчитать продолжительность процесса фильтрования для той же производительности фильтра по удельному объему фильтрата и определить производительность фильтра по удельному объему фильтрата за то же время опыта, но для другого перепада давления, заданного преподавателем.

2.6 Содержание отчета

Протокол отчета должен содержать цель работы, схему экспериментальной установки, отчетную таблицу, график для определения констант фильтрования, все необходимые расчеты и выводы по работе.

2.7 Контрольные вопросы

- 1) Назначение процесса фильтрования?
- 2) Как осуществляется процесс фильтрования и что является движущей силой этого процесса?
- 3) Как создается разность давления в фильтрах?
- 4) Какие материалы используются в качестве фильтровальных перегородок?
- 5) Какие существуют разновидности процесса фильтрования?
- 6) Как классифицируются осадки по степени их сжимаемости?
- 7) Что понимают под скоростью фильтрования и удельным объемом фильтрата?
- 8) Какие параметры влияют на скорость фильтрования, и как она зависит от этих параметров? Какова размерность этих параметров?
- 9) Каков физический смысл удельного сопротивления осадка?
- 10) Какие факторы и как влияют на величину удельного сопротивления осадка?

- 11) Как записывается уравнение для расчета фильтрования суспензий при постоянном перепаде давления с образованием несжимаемого осадка, и какие расчеты можно выполнять с помощью этого уравнения?
- 12) Как можно получить это уравнение?
- 13) Как записываются выражения для констант фильтрования?
- 14) Как записывается уравнение для фильтрования суспензий с образованием слоя несжимаемого осадка при постоянной скорости процесса, и какие расчёты можно выполнить с помощью этого уравнения?
- 15) Какова методика определения, констант фильтрования, удельного сопротивления осадка и сопротивления фильтровальной перегородки?
- 16) Каковы соотношения между константами фильтрования для двух процессов фильтрования, отличающихся, при прочих равных условиях, только величиной разности перепадов давления?
- 17) Изобразить схему устройства экспериментальной установки и пояснить принцип ее работы. Как устроен элемент вакуум-фильтра?
- 18) Изложить порядок проведения опыта по разделению суспензии.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОАГУЛЯЦИИ (ФЛОКУЛЯЦИИ) И ОТСТАИВАНИЯ СУСПЕНЗИЙ

3.1 Цель работы

Оценить преимущества стесненного осаждения при использовании коагулянтов по сравнению с обычным стесненным осаждением.

Ознакомление с методикой проведения эксперимента. Экспериментальное определение скорости стесненного осаждения частиц. Знакомство с методами интенсификации процесса.

3.2 Содержание работы

- 1) Подготовить суспензии для испытания (две одинаковые по объему пробы).
- 2) В одну из проб внести дозу коагулянта
- 3) Поставить обе дозы на отстаивание.
- 4) Снять кривые осаждения
- 5) Сопоставить скорости осаждения в обоих вариантах

3.3 Теоретическая часть

3.3.1 Основные положения

Коагуляция — это слипание частиц коллоидной системы при их столкновениях в процессе теплового движения, перемешивания или направленного перемещения во внешнем силовом поле. В результате коагуляции образуются агрегаты — более крупные (вторичные) частицы, состоящие из скопления мелких (первичных).

Коагулянты, коагулирующие агенты (от лат. *coagulo* — вызываю свёртывание, сгущение), вещества, введение которых в жидкую среду, содержащую мелкие частицы какого-либо тела, вызывает коагуляцию, т. е. слипание этих частиц. Эффективными коагулянтами для систем с водной дисперсионной средой являются соли поливалентных металлов (алюминия, железа и др.). В качестве коагулянтов используют также водорастворимые органические высокомолекулярные соединения (полимеры), особенно полиэлектролиты. В отличие от неорганических коагулянтов, их иногда называют флокулянтами.

В сточных водах могут содержаться твердые (каолин, глина, волокна, цемент, кристаллы солей и др.) и жидкие (нефть, нефтепродукты, смолы и др.) частицы.

Сточные воды многих производств после сооружений механической очистки представляют собой агрегативно устойчивую систему. Для их очистки применяют методы коагуляции; агрегативная устойчивость при этом нарушается, образуются более крупные агрегаты частиц, которые удаляются из сточных вод механическими методами.

Одним из видов коагуляции является флокуляция, при которой мелкие частицы, находящиеся во взвешенном состоянии, под влиянием специаль-

но добавляемых веществ (флокулянтов) образуют интенсивно оседающие рыхлые хлопьевидные скопления.

Эффективность коагуляционной очистки зависит от многих факторов: вида коллоидных частиц; их концентрации и степени дисперсности; наличия в сточных водах электролитов и других примесей; величины электрокинетического потенциала.

Процесс очистки сточных вод методом коагуляции или флокуляции включает приготовление водных растворов коагулянтов или флокулянтов, их дозирование, смешение со всем объемом сточной воды, хлопьеобразование, выделение хлопьев из нее.

Приготовление и дозирование коагулянтов производят в виде растворов или суспензий. Растворение коагулянтов осуществляют в баках (не менее двух). Концентрация раствора коагулянта в растворных баках должна составлять 10..17 %. Продолжительность растворения при температуре воды 10 °С принимают равной 10..12 ч.

Коагулянты смешивают с обрабатываемой сточной водой в смесителях, продолжительность пребывания воды в которых составляет 1...2 мин. Применяют перегородчатые, дырчатые, шайбовые вертикальные смесители, а также механические с пропеллерными или лопастными мешалками.

После смешения сточных вод с коагулянтами начинается процесс образования хлопьев, который происходит в камерах хлопьеобразования. Эти камеры могут быть водоворотные, перегородчатые, вихревые, а также с механическим перемешиванием.

Водоворотные камеры хлопьеобразования (рис. 8) представляют собой цилиндр, в верхнюю часть которого из смесителя вводится сточная вода с вращательной скоростью на выходе из сопла 2...3 м/с. В нижней части камеры перед выходом в отстойник находятся гасители вращательного движения воды. Продолжительность пребывания воды в камере 15...20 мин.

Водоворотные камеры конструктивно объединяют с вертикальными отстойниками. Время пребывания воды в камере принимают равным $\tau_k = 15...20$ мин, а время отстаивания $\tau_{oc} = 1$ ч. Скорость выхода воды из сопла $u_c = 2...3$ м/с. Высота камеры $H_{к.х} = 3,6...4$ м.

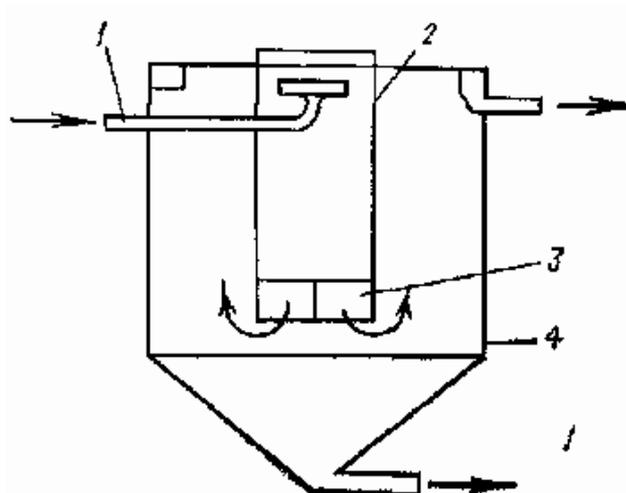


Рис. 8. – Водоворотная камера
1 — подвод воды; 2 — камера; 3 — гаситель; 4 — отстойник

Если в сточных водах концентрация взвешенных веществ, способных к агрегации, не превышает 4 г/л, то применяют осветлители со взвешенным слоем осадка (рис. 9).

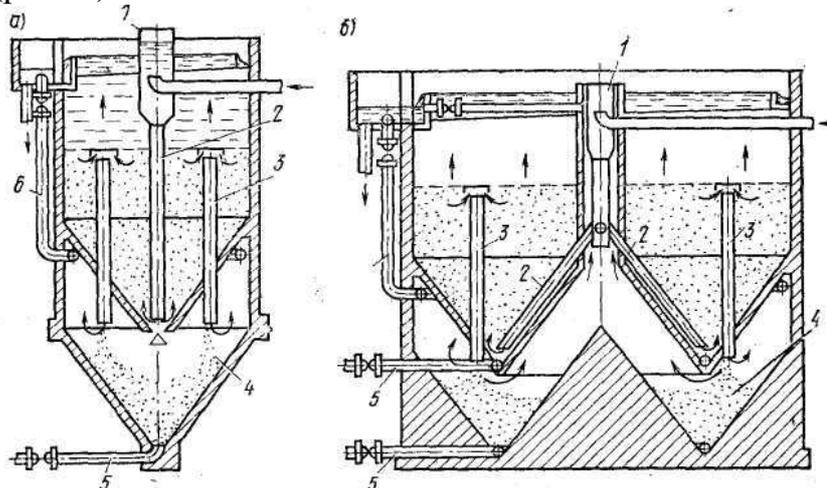


Рисунок 9. – Осветлители со взвешенным слоем осадка: 1 — воздухоотделитель; 2 — опускные трубы; 3 — осадкоотводные трубы или окна; 4 — осадкоуплотнитель; 5, 6 — трубопроводы выпуска осадка и отвода осветленной воды из осадкоуплотнителя.

В осветлителях происходят три основных процесса: смешение, коагуляция и осветление сточных вод. Обрабатываемая в осветлителях сточная вода проходит снизу вверх через слой ранее выделившегося шлама с такой скоростью, при которой взвешенные частицы не уносятся из зоны взвешенного осадка. При движении сточной воды через взвешенный слой увеличивается эффект задержания мелких суспензированных частиц. Осветлители проектируются круглыми (диаметр до 15 м) или прямоугольными в плане, площадь осветлителя не должна превышать 150 м².

3.4 Схема лабораторной установки

Для оценки скорости стесненного осаждения. Скорость стесненного осаждения можно оценить, наблюдая за скоростью образования светлого слоя при разделении суспензии в прозрачном сосуде. При разделении суспензии (концентрированной, содержание твердой фазы в пределах 10%) образуется довольно четкая граница раздела между образующимся в верхней части сосуда светлым слоем и суспензией. В процессе разделения объем светлого слоя непрерывно возрастает, поэтому, оценивая скорость увеличения объема светлого слоя можно оценить (ориентировочно) скорость стесненного осаждения.

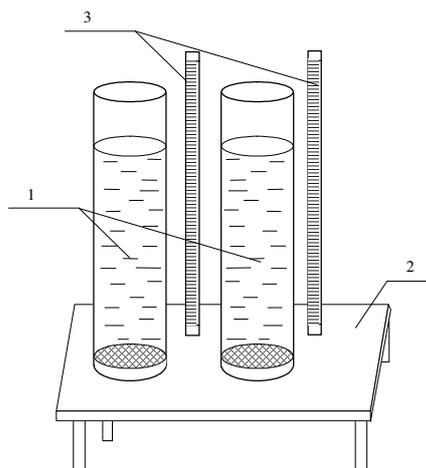


Рис. 9. – Схема экспериментальной установки: 1– стеклянные цилиндры; 2 –подставка; 3 – сетчатая ловушка; 4 – державка; 5 – подсветка

3.5 Методика проведения эксперимента

- 1) оба стеклянных цилиндра 1 поставить на подставку 2, наполнить их фильтрованной водой по 1 литру каждый;
- 2) взять 1 чайную ложку каолина (белая глина), взвесить массу (значение записать в таблицу);
- 3) в каждый цилиндр добавить по чайной ложке каолина и хорошо всё перемешать;
- 4) в один цилиндр добавить 30 мл заранее приготовленного 10 % водного раствора флокулянта.
- 5) измерить с помощью линейки 3 высоту слоя суспензии (значение записать в таблицу);
- 6) включить секундомер, наблюдать процесс осаждения в двух цилиндрах;
- 7) через равные промежутки времени (2 мин) измерять с помощью линеек значения высоты светлого слоя (записывать в таблицу) для двух вариантов;
- 8) наглядно определить эквивалентный диаметр образовавшихся хлопьев (значение записать в таблицу);

- 9) измерения прекратить после того, как высота слоя суспензии практически перестанет изменяться;
- 10) замерить объем осадка.

3.6 Методика обработки экспериментальных данных

- 1) определить начальную и конечную концентрацию твердой фазы в суспензии:

$$C_{нач} = m_{\kappa} / V_{сусп} ,$$

$$C_{кон} = m_{\kappa} / V_{осадка} ,$$

где m_{κ} – масса использованного каолина, кг;

$V_{сусп}$ – начальный объем суспензии, м³;

$V_{осадка}$ – объем осадка, м³.

- 2) построить график зависимости высоты светлого слоя от времени для двух вариантов;
- 3) определить скорость консолидированного осаждения твердой фазы:

$$\delta_{оси} = \frac{2h_{i-2} + h_i - h_{i+1} + 2h_{i+2}}{10 \cdot \Delta\tau} ;$$

- 4) построить график зависимости скорости консолидированного осаждения твердой фазы от времени.

3.7 Контрольные вопросы

- 1) Что такое коагуляция?
- 2) Какие аппараты применяются для процесса коагуляции?
- 3) Что образуется в результате коагуляции?
- 4) Опишите механизм действия флокулянтов?
- 5) Факторы, влияющие на скорость коагуляции?
- 6) Что образуется в результате флокуляции?
- 7) В каком случае применяют гетерокоагуляцию?
- 8) В чем заключается смысл процесса коагуляции?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ СУСПЕНЗИЙ В ОСАДИТЕЛЬНОЙ ЦЕНТРИФУГЕ

4.1 Цель работы

Приобретение навыков по очистке воды от твердых частиц методом центрифугирования, экспериментальное определение эффективности разделения в осадительной центрифуге периодического действия и ее расчет.

4.2 Содержание работы

Определение эффективности разделения суспензии в осадительной центрифуге периодического действия.

- 1) Ознакомиться с закономерностями центрифугирования.
- 2) Провести опыты по разделению модельных суспензий.
- 3) Провести расчет осадительной центрифуги по варианту.

4.3 Теоретическая часть

4.3.1 Основные понятия и термины

Центрифугирование, суспензия, осаждение, фактор разделения, фугат, кек, флокулянт, вертикальная осадительная центрифуга, центрифуга шнекового типа.

4.3.2 Основные положения

Центрифугирование – это процесс разделения неоднородных систем (суспензий, эмульсий, шламов и ряд других систем) под действием центробежных сил, создаваемых в результате вращения ротора с объектом. При этом на тела (частицы) действует центробежная сила:

$$F_{ц} = m \cdot \frac{v^2}{R} = m\omega^2 R$$

где m – масса частицы; v – линейная скорость частицы, ω – угловая скорость вращения; R – радиус вращения.

Как видно из формулы, изменяя скорость и радиус, можно получить силу в сотни и тысячи раз больше гравитационной, что влияет на скорость осаждения, производительности и компактности аппарата.

Центрифугирование суспензий осуществляется в центрифугах и гидроциклонах. Аппараты для разделения и концентрирования эмульсий также называются сепараторами. Центрифугирование растворов не применяется, так как центробежное поле, развиваемое в современных центрифугах, не позволяет преодолеть силы диффузии.

По значениям фактора разделения центрифуги подразделяют на: нормальные центрифуги ($Fr < 4000$) и суперцентрифуги ($Fr > 4000$). К настоящему времени максимальное значение фактора разделения промышленных центрифуг достигло значения 15000, а небольших – 9000. Фактор разделения центрифуги или центробежная критерия Фруда называется величина, показывающая на сколько центробежная сила превышает гравитации:

$$Fr = \omega^2 R / g$$

Где ω – угловая скорость вращения ротора центрифуги, рад/с ; R – характерный размер ротора (радиус), м.

Еще одной из основных характеристик центрифуг является индекс производительности Σ - площадь поверхности осаждения такого идеального гравитационного отстойника, который может быть заменен центрифугой, выполняющей его функции. Для цилиндрического ротора:

$$\Sigma = 4\pi R^2 L \omega^2 / g$$

Где L – длина (высота) ротора, м

Важной характеристикой центрифуг является крупность разделения – наиболее крупные частицы дисперсной фазы, которые могут быть вынесены с фугатом (очищенной водой):

$$d_{кр} = \sqrt{\frac{18\mu Q}{\Sigma(\rho - \rho_{жс})g}}$$

Где μ – динамическая вязкость очищаемой жидкости, Па·с; ρ и $\rho_{жс}$ - плотность взвешенных частиц и жидкости, кг/м³.

Центрифуги подразделяются на горизонтальные и вертикальные производственные и лабораторные, непрерывные и периодические, осаждающие и осветляющие. По способу выгрузки осадка центрифуги подразделяются на ручной, шнековый, пульсирующий.

Для центрифугирования требуется создавать центробежное поле достаточно высокой напряженности, для чего необходим регулируемый режим высокочастотного вращения материалов в некоторой емкости. Вокруг оси вращаются емкости. Суспензия вместе с ротором центрифуги совершает вращательное движение с угловой скоростью:

$$\omega = 2\pi n, \text{ рад/с,}$$

Где n – частота вращения, об/с.

При этом на частицу массой m действует центробежная сила:

$$F_{ц} = m\omega^2 r, \text{ Н.}$$

Где r – расстояние от оси вращения до частицы.

Удельная (на 1 м³) движущая сила процесса осаждения с учетом архимедовой силы запишется в виде:

$$f = (\rho_{т} - \rho)\omega^2 r, \text{ Н / м}^3.$$

Где $\rho_{т}$ и ρ – соответственно плотности твердых частиц и жидкости, кг/м³. Поскольку за счет высокой частоты вращения центробежное ускорение $\omega^2 r$ намного больше ускорения силы тяжести g , то в поле центробежных сил наблюдается существенное возрастание скорости осаждения и суспензия разделяется на осветленную жидкость и осадок.

4.4 Описание лабораторной установки и методика проведения эксперимента

На рисунке 10 представлена схема лабораторной центрифуги.

В лабораторной работе в качестве жидкой фазы используется вода, твердая фаза – каолин (белая глина, $\rho_T = 2800 \text{ кг/м}^3$)

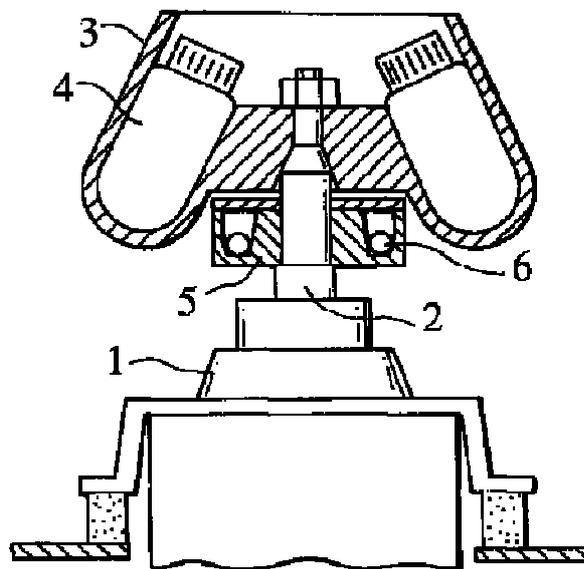


Рис. 10. – Лабораторная центрифуга: 1 – двигатель, 2 – вал, 3 – барабан, 4 – емкости для обрабатываемой жидкости; 5 – шаровой АБУ; 6 – шары; 7 – беговая дорожка

4.5 Порядок выполнения лабораторной работы:

- 1) взвесить цилиндры центрифуги, результат записать в таблицу 3;
- 2) заполнить на 2/3 цилиндр центрифуги водой;
- 3) воду слить в мерный цилиндр, измерить объем и добавить еще 3 части воды такого же объема;
- 4) определить общий объем и записать в таблицу 3;
- 5) взвесить мерную ложечку, результат записать в таблицу 3;
- 6) мерной ложкой взять каолин, взвесить, результат записать в таблицу
- 7) приготовить суспензию, размешав каолина в воде известного объема (см. пункт 2);
- 8) разлить суспензию в равных частях по 4 цилиндрам центрифуги, измерить массу (масса цилиндров заполненных суспензией не должна отличаться более чем на 0,1 гр, в противном случае довести массу во всех цилиндрах до максимально получившейся с помощью чистой воды из шприца, в отчет указать объем добавленной воды) и записать результат в таблицу 4;
- 9) после того как масса цилиндров будет выровнена, установить их в роторе центрифуги, ротор закрыть крышкой и закрепить его с помощью фиксатора;

10) с помощью рукояток управления центрифугой установить требуемое число оборотов ротора и продолжительности разделения (значения записать в таблицу 3);

11) включить центрифугу в сеть и провести разделение суспензии в поле действия центробежных сил;

12) после остановки центрифуги снять фиксатор и крышку ротора, измерить расстояние от центра центрифуги до цилиндров, результат записать в таблице 3;

13) цилиндры с разделяемой суспензией вынуть из каналов ротора и аккуратно слить светлый слой из каждого цилиндра в мерный цилиндр (мерный цилиндр предварительно взвесить), объем полученного светлого слоя измерить, массу полученного светлого слоя определить по разности масс, результат записать в таблицы 3 и 4;

14) цилиндры с оставшимся на дне слоем осадка полученного в ходе разделения, результат записать в таблицу 4.

4.6 Методика обработки экспериментальных данных

Определить фактор разделения и удельную движущую силу процесса осаждения по выше представленным формулам.

Концентрация твердой фазы в суспензии определяется как:

$$C = m/V_{\text{вод.}},$$

где m - масса твердой фазы, гр;

$V_{\text{вод.}}$ - объем воды в суспензии, мл.

Объем в осадке:

$$V_{\text{вод.осад.}} = V_{\text{вод.}} - V_{\text{св.сл.}}$$

Для определения концентрации твердой фазы в светлом слое необходимо профильтровать светлый слой через предварительно взвешенный бумажный фильтр. Затем фильтр высушить и взвесить сухой фильтр с частицами твердой фазы. Количество твердой фазы определяется по разности масс фильтра до разделения светлого слоя и после. Аналогично можно определить массу твердой фазы в осадке. Определить эффективность разделения суспензии при центробежном осаждении:

$$\eta = \frac{m_{\text{ос}}}{m_{\text{исх}}}$$

Вычислить плотность светлого слоя по формуле:

$$\rho_{\text{св.сл.}} = \frac{m_{\text{св.сл.}}}{V_{\text{св.сл.}}}$$

Сравнить плотность воды при нормальных условиях.

Рассчитать процентное массовое содержание твердой фазы в суспензии исходное и в осадке:

$$\varphi = \frac{m_{\text{каолина}}}{V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Таблица 3

Единичные экспериментальные и расчетные данные

| r , м | n , об/мин | τ , мин | |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Экспериментальные данные | | Расчетные данные | |
| $m_{\text{м.ц.}}$, гр | $m_{\text{м.ц.+св.сл.}}$, гр | $m_{\text{св.сл.}}$, гр | |
| $m_{\text{м.л.}}$, гр | $m_{\text{м.л.+каолина}}$, гр | $m_{\text{каолина}}$, гр | $C_{\text{исходная}}$, гр/мл |
| $V_{\text{вод.нач.}}$, мл | $V_{\text{вод.добавл.}}$, мл | $V_{\text{вод.}}$, мл | |
| $V_{\text{св.сл.}}$, мл | | $V_{\text{вод.осад.}}$, мл | $C_{\text{в осадке}}$, гр/мл |

Таблица 4

Экспериментальные данные по исследованию разделения суспензий в поле действия центробежных сил.

| Номер цилиндра | Масса, гр/*плотность, гр/мл | | | | Содержание твердой фазы, % масс. | | | |
|----------------|-----------------------------|--------------|-----------|----------------|----------------------------------|----------|--------------|--------|
| | цилиндра | | | светлого слоя* | осадка | исходная | светлый слой | осадок |
| | пустого | с суспензией | с осадком | | | | | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |

4.7 Содержание отчета

- 1) Цель работы
- 2) Схема лабораторной центрифуги
- 3) Исходные и экспериментальные данные (таблицы 1,2)
- 4) Формулы расчета и результаты расчета физических величин
- 5) Выводы

4.8 Контрольные вопросы

- 1) Причины увеличения скорости осаждения в поле действия центробежных сил.
- 2) Скорость осаждения в поле действия центробежных сил.
- 3) Концентрация твердой фазы в суспензии.
- 4) Эффективность разделения суспензии в поле действия центробежных сил.
- 5) Фактор разделения.

Список рекомендуемой литературы

1. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: учеб. Пособие. – М.: Высшая школа, 2008. – 397 с.
2. Лашинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры 3-е изд., стереот. / А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский. – М.: Альянс, 2008. – 752 с.
3. 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., переаб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
4. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М.Г. Зиганшин, А.А. Колесник, В.Н. Посохин: пособие по проектированию – М.: «Экопресс - ЗМ», 1998. – 505 с.
5. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. 2-е изд., испр. и доп. – Л.: Химия, 1978. – 392 с.
6. Рамм В.М. Абсорбция газов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
7. Швыдский В.С. Очистка газов: справочное пособие / В.С. Швыдский, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.
8. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Перепечатка с издания 1987 г 14-е изд., стер. / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков / под ред. Романкова П.Г. – М.: Альянс, 2007. - 576 с.

Приложение А – Характеристики насадок

| Насадки | $a, \text{ м}^2/\text{м}^3$ | $v, \text{ м}^3/\text{м}^3$ | $d_s, \text{ м}$ | $\rho, \text{ кг}/\text{м}^3$ | Число штук в 1 м^3 |
|--|-----------------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Регулярные насадки | | | | | |
| Деревянная хордовая (10×100), шаг в свету: | | | | | |
| 10 | 100 | 0,55 | 0,022 | 210 | — |
| 20 | 65 | 0,68 | 0,042 | 145 | — |
| 30 | 48 | 0,77 | 0,064 | 110 | — |
| Керамические кольца Рашига: | | | | | |
| 50×50×5 | 110 | 0,735 | 0,027 | 650 | 8 500 |
| 80×80×8 | 80 | 0,72 | 0,036 | 670 | 2 200 |
| 100×100×10 | 60 | 0,72 | 0,048 | 670 | 1 050 |
| Неупорядоченные насадки | | | | | |
| Керамические кольца Рашига: | | | | | |
| 10×10×1,5 | 440 | 0,7 | 0,006 | 700 | 700 000 |
| 15×15×2 | 330 | 0,7 | 0,009 | 690 | 220 000 |
| 25×25×3 | 200 | 0,74 | 0,015 | 530 | 50 000 |
| 35×35×4 | 140 | 0,78 | 0,022 | 530 | 18 000 |
| 50×50×5 | 90 | 0,785 | 0,035 | 530 | 6 000 |
| Стальные кольца Рашига: | | | | | |
| 10×10×0,5 | 500 | 0,88 | 0,007 | 960 | 770 000 |
| 15×15×0,5 | 350 | 0,92 | 0,012 | 660 | 240 000 |
| 25×25×0,8 | 220 | 0,92 | 0,017 | 640 | 55 000 |
| 50×50×1 | 110 | 0,95 | 0,035 | 430 | 7 000 |
| Керамические кольца Палля: | | | | | |
| 25×25×3 | 220 | 0,74 | 0,014 | 610 | 46 000 |
| 35×35×4 | 165 | 0,76 | 0,018 | 540 | 18 500 |
| 50×50×5 | 120 | 0,78 | 0,026 | 520 | 5 800 |
| 60×60×6 | 96 | 0,79 | 0,033 | 520 | 3 350 |
| Стальные кольца Палля: | | | | | |
| 15×15×0,4 | 380 | 0,9 | 0,010 | 525 | 230 000 |
| 25×25×0,6 | 235 | 0,9 | 0,015 | 490 | 52 000 |
| 35×35×0,8 | 170 | 0,9 | 0,021 | 455 | 18 200 |
| 50×50×1,0 | 108 | 0,9 | 0,033 | 415 | 6 400 |
| Керамические седла Берля: | | | | | |
| 12,5 | 460 | 0,68 | 0,006 | 720 | 570 000 |
| 25 | 260 | 0,69 | 0,011 | 670 | 78 000 |
| 38 | 165 | 0,7 | 0,017 | 670 | 30 500 |
| Керамические седла «Инталокс»: | | | | | |
| 12,5 | 625 | 0,78 | 0,005 | 545 | 730 000 |
| 19 | 335 | 0,77 | 0,009 | 560 | 229 000 |
| 25 | 255 | 0,775 | 0,012 | 545 | 84 000 |
| 38 | 195 | 0,81 | 0,017 | 480 | 25 000 |
| 50 | 118 | 0,79 | 0,027 | 530 | 9 350 |

Примечание. a — удельная поверхность; v — свободный объем; d_s — эквивалентный диаметр; ρ — насыпная плотность.

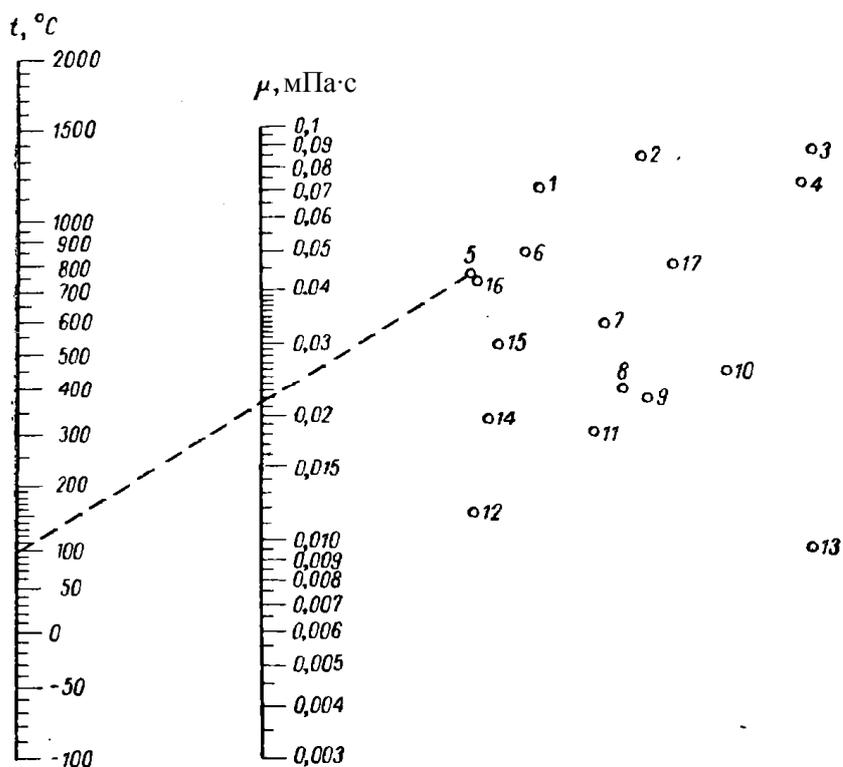
Значения коэффициентов A и B приведены ниже [3]:

| Тип насадки | A | B |
|-----------------------------|------------------------------|------|
| Трубчатая | $0,47 + 1,5 \lg (d_s/0,025)$ | 1,75 |
| Плоскопараллельная хордовая | 0 | 1,75 |
| Пакетная | 0,062 | 1,55 |
| Кольца Рашига внавал | -0,073 | 1,75 |
| Кольца Палля | -0,49 | 1,04 |
| Седла размером 25 мм | -0,33 | 1,04 |
| Седла размером 50 мм | -0,58 | 1,04 |

| | | | |
|--------------------------|----------|----------------------|----------|
| <i>Насадка</i> | <i>b</i> | <i>Насадка</i> | <i>b</i> |
| Кольца Рашига в укладку: | | Кольца Палля (50 мм) | 126 |
| 50 мм | 173 | Блоки керамические | 151 |
| 80 мм | 144 | Седла «Инталокс»: | |
| 100 мм | 119 | 25 мм | 33 |
| Кольца Рашига внавал: | | 50 мм | 28 |
| 25 мм | 184 | Седла Берля (25 мм) | 30 |
| 50 мм | 169 | | |

| Насадка | <i>c</i> | <i>b · 10³</i> | <i>p</i> | <i>q</i> | <i>R_Г</i> | <i>R_ж</i> |
|-------------------------|----------|---------------------------|----------|----------|----------------------|----------------------|
| Кольца Рашига в укладку | | | | | | |
| 50 мм | 23 | 48 | 0,0194 | 0,0086 | 0,55 | 1,23 |
| 80 мм | 9,4 | 40 | 0,0087 | 0,0113 | 0,36 | 1,24 |
| 100 мм | 6,5 | 33 | 0,0078 | 0,0146 | 0,24 | 1,27 |
| Кольца Рашига внавал | | | | | | |
| 25 мм | 285 | 51 | 0,0367 | 0,0086 | 1,43 | 1,28 |
| 50 мм | 85 | 47 | 0,024 | 0,012 | 0,69 | 1,29 |
| Кольца Палля (50 мм) | 54 | 35 | 0,021 | 0,0116 | 0,93 | 1,4 |
| Блоки (по рис. IV-9, б) | 20 | 42 | 0,0088 | 0,0086 | 0,35 | 1,12 |

Приложение Б – Номограмма для определения динамического коэффициента вязкости газов при $p=1$ атм



1—O₂; 2—NO; 3—CO₂; 4—HCl; 5—воздух; 6—N₂; 7—SO₂; 8—CH₄; 9—H₂O;
10—NH₃; 11—C₂H₆; 12—H₂; 13—C₆H₆; 14—9H₂+N₂; 15—3H₂+N₂; 16—CO;
17—Cl₂.

(с допустимым приближением данными номограммы можно пользоваться и при давлении порядка нескольких атмосфер)

Приложение В – Некоторые характеристики воды

| Температура, °С | Динамический коэффициент вязкости мПа*с (сП) | Температура, °С | Динамический коэффициент вязкости мПа*с (сП) | Температура, °С | Динамический коэффициент вязкости мПа*с (сП) |
|-----------------|--|-----------------|--|-----------------|--|
| 0 | 1,792 | 33 | 0,7523 | 67 | 0,4233 |
| 1 | 1,731 | 34 | 0,7371 | 68 | 0,4174 |
| 2 | 1,673 | 35 | 0,7225 | 69 | 0,4117 |
| 3 | 1,619 | 36 | 0,7085 | 70 | 0,4061 |
| 4 | 1,567 | 37 | 0,6947 | 71 | 0,4006 |
| 5 | 1,519 | 38 | 0,6814 | 72 | 0,3952 |
| 6 | 1,473 | 39 | 0,6685 | 73 | 0,3900 |
| 7 | 1,428 | 40 | 0,6560 | 74 | 0,3849 |
| 8 | 1,386 | 41 | 0,6439 | 75 | 0,3799 |
| 9 | 1,346 | 42 | 0,6321 | 76 | 0,3750 |
| 10 | 1,308 | 43 | 0,6207 | 77 | 0,3702 |
| 11 | 1,271 | 44 | 0,6097 | 78 | 0,3655 |
| 12 | 1,236 | 45 | 0,5988 | 79 | 0,3610 |
| 13 | 1,203 | 46 | 0,5883 | 80 | 0,3565 |
| 14 | 1,171 | 47 | 0,5782 | 81 | 0,3521 |
| 15 | 1,140 | 48 | 0,5683 | 82 | 0,3478 |
| 16 | 1,111 | 49 | 0,5588 | 83 | 0,3436 |
| 17 | 1,083 | 50 | 0,5494 | 84 | 0,3395 |
| 18 | 1,056 | 51 | 0,5404 | 85 | 0,3355 |
| 19 | 1,030 | 52 | 0,5315 | 86 | 0,3315 |
| 20 | 1,005 | 53 | 0,5229 | 87 | 0,3276 |
| 20,2 | 1,000 | 54 | 0,5146 | 88 | 0,3239 |
| 21 | 0,9810 | 55 | 0,5064 | 89 | 0,3202 |
| 22 | 0,9579 | 56 | 0,4985 | 90 | 0,3165 |
| 23 | 0,9358 | 57 | 0,4907 | 91 | 0,3130 |
| 24 | 0,9142 | 58 | 0,4832 | 92 | 0,3095 |
| 25 | 0,8937 | 59 | 0,4759 | 93 | 0,3060 |
| 26 | 0,8737 | 60 | 0,4688 | 94 | 0,3027 |
| 27 | 0,8545 | 61 | 0,4618 | 95 | 0,2994 |
| 28 | 0,8360 | 62 | 0,4550 | 96 | 0,2962 |
| 29 | 0,8180 | 63 | 0,4483 | 97 | 0,2930 |
| 30 | 0,8007 | 64 | 0,4418 | 98 | 0,2899 |
| 31 | 0,7840 | 65 | 0,4355 | 99 | 0,2868 |
| 32 | 0,7679 | 66 | 0,4293 | 100 | 0,2838 |

| Температура, °С | Плотность, кг/м ³ |
|-----------------|------------------------------|
| 0 | 999.8 |
| 10 | 999.7 |
| 20 | 998.3 |
| 30 | 995.7 |
| 40 | 992.3 |
| 50 | 988.0 |
| 60 | 983.2 |
| 70 | 971.6 |
| 80 | 965.2 |

Приложение Г – Парциальное давление SO₂ (в мм рт. ст.) над водными растворами диоксида серы

| Концентрация SO ₂ , % (масс.) | 10 °С | 20 °С | 30 °С | 40 °С |
|--|-------|-------|-------|-------|
| 0,497 | 21 | 29 | 42 | 60 |
| 0,99 | 42 | 59 | 85 | 120 |
| 1,902 | 86 | 123 | 176 | 245 |
| 2,438 | 108 | 157 | 224 | 311 |
| 3,381 | 153 | 227 | 324 | 447 |
| 4,761 | 223 | 338 | 482 | 661 |
| 5,66 | 271 | 411 | 588 | 804 |
| 6,542 | 320 | 486 | 698 | |
| 7,407 | 370 | 562 | 806 | |
| 8,675 | 447 | 676 | | |
| 9,411 | 499 | 751 | | |
| 9,91 | 526 | 789 | | |

[×] Источник: Рабинович В.А., Хавин З.Я. *Краткий химический справочник*. Изд. 2-е, испр. и доп. Л.: Химия, 1978. С. 286.

Приложение Д – Значения коэффициента Генри Е для водных растворов
некоторых газов

| Газ | Температура, °С | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 60 | 80 | 100 |
| Азот | 40,2 | 45,4 | 50,8 | 56,1 | 61,1 | 65,7 | 70,2 | 79,2 | 90,9 | 95,9 | 105,4 |
| Ацетилен | 0,55 | 0,64 | 0,73 | 0,82 | 0,92 | 1,01 | 1,11 | - | - | - | - |
| Бром | 0,0162 | 0,0209 | 0,0278 | 0,0354 | 0,0451 | 0,056 | 0,0688 | 0,101 | 0,191 | 0,307 | - |
| Водород | 44 | 46,2 | 48,3 | 50,2 | 51,9 | 53,7 | 55,4 | 57,1 | 58,1 | 57,4 | 56,6 |
| Воздух | 32,8 | 37,1 | 41,7 | 46,1 | 50,4 | 54,7 | 58,6 | 66,1 | 76,5 | 81,7 | 81,6 |
| Диоксид угле- рода | 0,553 | 0,666 | 0,792 | 0,93 | 1,08 | 1,24 | 1,41 | 1,77 | 2,59 | - | - |
| Кислород | 19,3 | 22,1 | 24,9 | 27,7 | 30,4 | 33,3 | 36,1 | 40,7 | 47,8 | 52,2 | 53,3 |
| Метан | 17 | 19,7 | 22,6 | 25,6 | 28,5 | 31,4 | 34,1 | 39,5 | 47,6 | 51,8 | 53,3 |
| Оксид угле- рода | 26,7 | 30 | 33,6 | 37,2 | 40,7 | 44 | 47,1 | 52,9 | 62,5 | 64,3 | 64,3 |
| Сероводород | 0,203 | 0,239 | 0,278 | 0,321 | 0,367 | 0,414 | 0,463 | 0,566 | 0,782 | 1,03 | 1,12 |
| Хлор | 0,204 | 0,25 | 0,297 | 0,346 | 0,402 | 0,454 | 0,502 | 0,6 | 0,731 | 0,73 | - |
| Этан | 9,55 | 11,8 | 14,4 | 17,2 | 20 | 23 | 26 | 32,2 | 42,9 | 50,2 | 52,6 |
| Этилен | 4,19 | 4,96 | 5,84 | 6,8 | 7,74 | 8,67 | 9,62 | - | - | - | - |

(в таблице даны значения $E \cdot 10^{-6}$ в мм. рт. ст, 1 мм.рт.ст = 133.3 Па)

Приложение Е – Внутренние базовые диаметры цилиндрических обечаек

| | | | | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | (450) | 500 | (550) | 600 |
| (650) | 700 | 750 | 800 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1100 |
| 1200 | (1300) | 1400 | (1500) | 1600 | (1700) | 1800 | (1900) | 2000 |
| 2200 | 2400 | 2600 | 2800 | 3000 | 3200 | 3400 | 3600 | 3800 |
| 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 | 6400 | 7000 | 8000 | 9000 |
| 10 000 | 11 000 | 12 000 | 14 000 | 16 000 | 18 000 | 20 000 | — | — |
| <p>П р и м е ч а н и я:</p> <p>1. Настоящий ряд диаметров распространяется на металлические обечайки, изготавливаемые из листов. При этом для цветных металлов и сплавов действительны диаметры только до 3800 мм.</p> <p>2. Для стальных обечаек диаметры, заключенные в скобки, следует применять только для обогреваемых или охлаждаемых рубашек аппаратов.</p> <p>3. Диаметры, заключенные в прямоугольные рамки, действительны только для обечаек из цветных металлов и сплавов.</p> <p>4. Настоящий ряд диаметров до 2000 мм рекомендуется применять при конструировании литых и кованных металлических корпусов аппаратов, а также любых корпусов и обечаек — из неметаллических материалов.</p> | | | | | | | | |

диаметр указан в мм

в соответствии с ГОСТом 9617-67

Приложение Ж – Некоторые характеристики водных растворов щелочей

| C _M , моль/л | LiOH | | NaOH | | KOH | | CsOH | |
|----------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|------------|------------------------|
| | η мПа·с | ρ г/см ³ |
| 0.5 | 1.017 | 1.012 | 0.997 | 1.019 | 0.937 | 1.022 | 0.91 | 1.063 |
| 1.0 | 0.169 | 1.025 | 1.116 | 1.040 | 0.990 | 1.045 | 0.94 | 1.128 |
| 1.5 | 1.340 | 1.038 | 1.248 | 1.059 | 1.050 | 1.068 | 0.97 | 1.193 |
| 2.0 | 1.537 | 1.050 | 1.396 | 1.078 | 1.116 | 1.090 | 1.03 | 1.257 |
| 3.0 | 2.050 | 1.072 | 1.754 | 1.115 | 1.269 | 1.133 | 1.19 | 1.383 |
| 4.0 | 2.734 | 1.093 | 2.228 | 1.149 | 1.448 | 1.174 | 1.41 | 1.508 |
| 5.0 | | | 2.867 | 1.182 | 1.657 | 1.214 | 1.67 | 1.632 |
| 6.0 | | | 3.727 | 1.213 | 1.902 | 1.253 | 1.98 | 1.755 |
| 7.0 | | | 4.869 | 1.243 | 2.196 | 1.290 | 2.40 | 1.876 |
| 8.0 | | | 6.351 | 1.271 | 2.554 | 1.326 | 3.09 | 1.997 |
| 9.0 | | | 8.230 | 1.299 | 3.005 | 1.362 | 4.31 | 2.117 |
| 10.0 | | | 10.554 | 1.325 | 3.581 | 1.396 | 6.46 | 2.236 |
| 11.0 | | | 13.362 | 1.350 | 4.328 | 1.429 | | 2.354 |
| 12.0 | | | 16.677 | 1.374 | 5.303 | 1.462 | | 2.471 |
| 13.0 | | | 20.503 | 1.397 | 6.577 | 1.494 | | 2.587 |
| 14.0 | | | 24.826 | 1.419 | 8.235 | 1.524 | | 2.703 |
| 15.0 | | | 29.604 | 1.441 | | | | |
| 16.0 | | | 34.767 | 1.461 | | | | |
| 17.0 | | | 40.212 | 1.481 | | | | |
| 18.0 | | | 45.800 | 1.499 | | | | |
| 19.0 | | | 51.354 | 1.517 | | | | |

ThermalInfo.ru

Приложение 3 – Способы выражения состава фаз двухкомпонентных систем жидкость – газ (пар) [8]

| Концентрация | Обозначение концентрации компонента А | |
|--|---------------------------------------|----------------------------|
| | в жидкой фазе | в газовой или паровой фазе |
| Мольная доля, $\frac{\text{кмоль А}}{\text{кмоль (А + В)}}$ | x | y |
| Массовая доля, $\frac{\text{кг А}}{\text{кг (А + В)}}$ | \bar{x} | \bar{y} |
| Относительная мольная концентрация (доля), $\frac{\text{кмоль А}}{\text{кмоль В}}$ | X | Y |
| Относительная массовая концентрация (доля), $\frac{\text{кг А}}{\text{кг В}}$ | \bar{X} | \bar{Y} |
| Объемная мольная концентрация, $\frac{\text{кмоль А}}{\text{м}^3 \text{ (А + В)}}$ | C_x | C_y |
| Объемная массовая концентрация, $\frac{\text{кг А}}{\text{м}^3 \text{ (А + В)}}$ | \bar{C}_x | \bar{C}_y |

Продолжение приложения 3 – Формулы для пересчета концентраций в жидкой фазе [8]

| X | \bar{X} | C_x | \bar{C}_x |
|----------------------------------|--|--|--|
| $\frac{X}{1+X}$ | $\frac{M_B \bar{X}}{M_B \bar{X} + M_A}$ | $\frac{C_x M_{cm}}{\rho}$ или $\frac{C_x M_B}{\rho + C_x (M_B - M_A)}$ | $\frac{\bar{C}_x M_{cm}}{\rho M_A}$ или $\frac{\bar{C}_x M_B}{\rho M_A + \bar{C}_x (M_B - M_A)}$ |
| $\frac{M_A X}{M_A X + M_B}$ | $\frac{\bar{X}}{1 + \bar{X}}$ | $\frac{M_A C_x}{\rho}$ | $\frac{\bar{C}_x}{\rho}$ |
| — | $\frac{M_B \bar{X}}{M_A}$ | $\frac{M_B C_x}{\rho - M_A C_x}$ | $\frac{M_B \bar{C}_x}{M_A (\rho - \bar{C}_x)}$ |
| $\frac{M_A X}{M_B}$ | — | $\frac{M_A C_x}{\rho - M_A C_x}$ | $\frac{\bar{C}_x}{\rho - \bar{C}_x}$ |
| $\frac{\rho X}{M_A X + M_B}$ | $\frac{\rho \bar{X}}{M_A (\bar{X} + 1)}$ | — | $\frac{\bar{C}_x}{M_A}$ |
| $\frac{M_A \rho X}{M_A X + M_B}$ | $\frac{\rho \bar{X}}{\bar{X} + 1}$ | $M_A C_x$ | — |

X и смеси, кг/кмоль; $M_{cm} = M_A X + M_B (1 - X)$; ρ — плотность смеси, кг/м³.

| Выражение концентра- ции компо- нента А | x | \bar{x} |
|--|------------------------------|---|
| x | — | $\frac{\bar{x}M_{CM}}{M_A}$ или $\frac{\bar{x}/M_A}{\frac{\bar{x}}{M_A} + \frac{1-\bar{x}}{M_B}}$ |
| \bar{x} | $\frac{M_{Ax}}{M_{CM}}$ | — |
| X | $\frac{x}{1-x}$ | $\frac{\bar{x}M_B}{M_A(1-\bar{x})}$ |
| \bar{X} | $\frac{M_{Ax}}{M_B(1-x)}$ | $\frac{\bar{x}}{1-\bar{x}}$ |
| C_x | $\frac{\rho x}{M_{CM}}$ | $\frac{\rho \bar{x}}{M_A}$ |
| \bar{C}_x | $\frac{\rho M_{Ax}}{M_{CM}}$ | $\rho \bar{x}$ |

M_A, M_B, M_{CM} — молярные массы компонентов
Для смеси идеальных газов:
 $\frac{\rho}{M_{CM}} = \frac{P}{RT} = \frac{P P_0}{22,4 P_0 T}$.

Электронное учебное издание

Геннадий Михайлович **Бутов**
Олег Александрович **Тишин**
Елена Владимировна **Климова**
Сергей Васильевич **Орлов**

Процессы и аппараты защиты окружающей среды

Учебно-методическое пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2018 г. Поз. № 36.

Подписано к использованию 08.10.2018. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 2,69.

Волгоградский государственный технический университет.
400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.
404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.