

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**

Высшая школа технологии и энергетики

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ В ХИМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Выполнение контрольных работ

Методические указания для студентов заочной формы обучения
по направлению подготовки

15.03.02 — Технологические машины и оборудование

Составители:

А. О. Никифоров

М. Е. Донова

Санкт-Петербург

2023

Утверждено
на заседании кафедры ПиАХТ
06.02.2023 г., протокол № 6

Рецензент А. Н. Евдокимов

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплины «Технологические процессы и аппараты в химической отрасли» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование».

В методических указаниях представлен порядок выполнения и оформления контрольных работ. Приведены примеры расчета технологических процессов и аппаратов химической отрасли.

Методические указания предназначены для бакалавров заочной формы обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД
в качестве методических указаний.

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=202016, по паролю
- Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию: 20.09.2023 г. Рег. № 5216/23

Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД
198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Основы гидравлики	5
2. Гидромеханика неоднородных систем	6
3. Теплопередача	8
4. Выпаривание. Кристаллизация	9
5. Основы массопередачи. Абсорбция	11
6. Перегонка и ректификация	14
7. Экстрагирование	15
8. Адсорбция	16
9. Термическая сушка	17
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Титул для контрольных работ в офлайн-формате	20
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Титул для контрольных работ в онлайн-формате	21
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Задание для выполнения контрольных работ	22
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Требования к оформлению контрольных работ и критерии оценки контрольной работы	23

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Технологические процессы и аппараты в химической отрасли» изучает теорию основных процессов, принципы устройства и методы расчета аппаратов, использующихся в технологических и химических процессах.

При обучении бакалавров направления подготовки 15.03.02 «Технологические машины и оборудование» этой дисциплине отводится важная роль. Наряду с глубокими теоретическими знаниями студенты должны обладать практическими навыками расчета аппаратов, предназначенных для проведения химических процессов. Поэтому навыки решения задач позволят лучше понять работу аппаратов, в особенности это касается студентов заочной формы обучения, для которых составлены методические указания.

Перед началом работы над контрольными заданиями студентам необходимо ознакомиться с соответствующими разделами курса. Студентам рекомендуется пользоваться учебниками [1, 2] и учебными пособиями [3]. В контрольные работы включены задачи из источника литературы [4]. В соответствии со своими учебными графиками студенты выполняют контрольные работы. В приложении 3 приведена таблица, в которой перечислены номера задач для студентов всех направлений, номер варианта определяется по последней цифре шифра, указанного в зачетной книжке.

Приступая к решению задач, следует ознакомиться с общими указаниями, приведенными в работе [4], в соответствии со структурой задачника. В заключительной части раздела 9 работы [4] приведены условия задач, из которых составлены контрольные задания для студентов. В работе [4] также приведены контрольные задачи, а также обширный справочный материал, позволяющий получить все необходимые для решения данные. Если сессия проводится в офлайн-формате, то контрольные работы должны быть выполнены в тетрадях. Титульный лист оформляется в соответствии с приложением 1. На первой странице необходимо перечислить номера задач выполняемого варианта. В случае прохождения сессии средствами дистанционных образовательных технологий контрольная работа оформляется в текстовом редакторе и загружается в соответствующем разделе дисциплины в формате PDF. Титульный лист оформляется в соответствии с приложением 2.

После указания номера следует привести условия варианта из задачника, затем изобразить схему рассчитываемого устройства. Далее приводится решение. Расчетные формулы сначала должны быть представлены в виде алгебраического выражения, затем в них подставляются числовые значения и приводится результат расчета. Решение задачи должно сопровождаться подробными пояснениями. Обязательно приводятся размерности всех входящих в формулу физических величин. При расчете физические величины должны быть выражены в Международной системе единиц (СИ).

Успешное решение контрольных заданий позволит студентам подготовиться к сдаче зачетов и экзаменов по курсу «Технологические процессы и аппараты в химической отрасли».

1. ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ

По главе 1 задачника [2] «Основы гидравлики»

Сжимаемые и несжимаемые жидкости. Гидростатическое давление. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости Эйлера. Основное уравнение гидростатики. Гидродинамика вязких жидкостей. Вязкость жидкостей и газов. Динамический и кинематический коэффициенты вязкости. Влияние температуры и давления на вязкость жидкостей и газов.

Уравнение сплошности или неразрывности потока. Дифференциальные уравнения движения вязкой жидкости (уравнение Навье-Стокса).

Удельная механическая энергия потока. Статический и динамический напоры и их измерения. Средняя и максимальная скорости потока. Уравнение Бернулли и его приложения. Гидродинамические режимы движения вязкой жидкости. Гидродинамический пограничный слой.

Преобразование уравнений Навье-Стокса с получением критериев гидродинамического подобия. Гидравлические сопротивления в трубопроводах. Критериальные уравнения движения вязкой жидкости. Опытные зависимости для ламинарного и турбулентного течений. Расчет оптимального диаметра трубопровода.

Обтекание твердых тел. Расчет скорости свободного и стесненного осаждения частиц. Критериальное уравнение движения твердого тела в жидкости. Зависимости для ламинарного и турбулентного обтекания твердого тела. Основы гидродинамики неньютоновских жидкостей. Движение неньютоновских жидкостей в каналах и трубопроводах. Основы гидродинамики двухфазных систем. Классификация двухфазных систем. Модели двухфазных систем и принципы математического описания их движения. Гидродинамические характеристики систем жидкость – газ и жидкость – твердое тело. Теоретические основы гидро- и пневмотранспорта. Течение жидкостей через неподвижные зернистые слои и пористые перегородки. Структура потоков и распределение времени их пребывания в аппаратах.

Пример

Определить динамическую вязкость азотоводородной смеси при атмосферном давлении и 200 °С, содержащей различные объемные доли азота: 25 и 75 %. Давление и температура в обеих смесях одинаковы.

Решение:

Для определения динамической вязкости газовой смеси можно использовать следующую приближенную формулу аддитивности:

$$\frac{M_{см}}{\mu_{см}} = \sum_i \frac{y_i M_i}{\mu_i} = \frac{y(N_2) \cdot M(N_2)}{\mu(N_2)} + \frac{y(H_2) \cdot M(H_2)}{\mu(H_2)} \quad (1.1)$$

где $M_{см}$ – средняя молярная масса смеси кг/кмоль;

M_i – молярная масса компонента кг/кмоль;

y_i – объемная доля компонента;

μ_i – вязкость компонента Па*с;

$\mu_{см}$ – вязкость смеси Па*с.

Из уравнения (1.1) получаем:

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\frac{y(N_2) \cdot M(N_2)}{\mu(N_2)} + \frac{y(H_2) \cdot M(H_2)}{\mu(H_2)}}$$

Зависимость вязкости газа от температуры:

$$\mu_i = \mu_{i,0} \cdot \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} \quad (1.2)$$

где μ – вязкость газа при 0 С Па*с;

C – постоянная (табл. IV) [2].

Определяем вязкости компонентов из уравнения (1.2) при $20^\circ\text{C} = 293\text{K}$

$$\mu(N_2) = \mu_0(N_2) \cdot \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} = 17 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \frac{273 + 114}{293 + 114} \left(\frac{293}{273} \right)^{3/2} = 17.97 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

$$\mu(H_2) = \mu_0(H_2) \cdot \frac{273 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2} = 8.42 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с} \cdot \frac{273 + 73}{293 + 73} \left(\frac{293}{273} \right)^{3/2} = 8.85 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

I смесь – 25 % N_2

$$M_{см} = y(N_2)M(N_2) + y(H_2)M(H_2) = 0.25 \cdot 28 + 0.75 \cdot 2.02 = 8.515 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\frac{y(N_2) \cdot M(N_2)}{\mu(N_2)} + \frac{y(H_2) \cdot M(H_2)}{\mu(H_2)}} = \frac{8.515}{\frac{0.25 \cdot 28}{17.97 \cdot 10^{-6}} + \frac{0.75 \cdot 2.02}{8.85 \cdot 10^{-6}}} = 15.19 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

II смесь – 75 % N_2

$$M_{см} = y(N_2)M(N_2) + y(H_2)M(H_2) = 0.75 \cdot 28 + 0.25 \cdot 2.02 = 21.505 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$$

$$\mu_{см} = \frac{M_{см}}{\frac{y(N_2) \cdot M(N_2)}{\mu(N_2)} + \frac{y(H_2) \cdot M(H_2)}{\mu(H_2)}} = \frac{21.505}{\frac{0.75 \cdot 28}{17.97 \cdot 10^{-6}} + \frac{0.25 \cdot 2.02}{8.85 \cdot 10^{-6}}} = 17.55 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Ответ: для I смеси: $\mu_{см} = 15.19 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; для II смеси: $\mu_{см} = 17.55 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$

2. ГИДРОМЕХАНИКА НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

По главе 2 задачника [2] «Гидромеханика неоднородных систем»

Характеристика неоднородных систем. Методы разделения неоднородных систем. Принципы математического описания процессов разделения в силовом поле. Осаждение в поле силы тяжести. Конструкции отстойников и определение их основных размеров. Осаждение под действием центробежной силы в циклонах. Конструкции циклонов. Очистка газов и разделение аэрозолей в электрическом поле. Устройство электрофильтров.

Фильтрация суспензии. Движущая сила и сопротивление процесса фильтрации. Виды процесса фильтрации. Основные кинетические

уравнения фильтрования для режимов постоянного перепада давления и постоянной скорости. Осложняющие фильтрование явления. Определение сопротивления фильтра и осадка.

Фильтрование с закупориванием пор фильтра. Применение вспомогательных веществ для интенсификации процессов фильтрования.

Конструкции фильтров для разделения суспензий. Фильтр-прессы. ФПАК. Вакуум-фильтры непрерывного действия: барабанные, дисковые, ленточные фильтры непрерывного действия, работающие под давлением. Фильтрование газов от пыли. Конструкции фильтров для очистки газов от пыли.

Центрифугирование. Классификация центрифуг – отстойные, фильтрующие, сепараторы, периодические и непрерывно действующие. Классификация центрифуг по фактору разделения. Области применения центрифуг различных типов. Принципы технологического расчета отстойной и фильтрующей центрифуг.

Конструкция центрифуг различных типов – периодические, полунепрерывные, автоматические и непрерывно действующие.

Мокрая очистка запыленных газов. Конструктивные типы мокрых пылеуловителей.

Псевдооживление. Псевдооживление твердого зернистого материала. Физическая сущность процесса псевдооживления и его гидродинамическая характеристика. Технические области применения псевдооживления. Перемешивание в жидкой среде. Способы перемешивания. Получение суспензий и эмульсий. Моделирование процессов перемешивания.

Пример

Определить время промывки осадка $4,0 \text{ л/м}^2$ промывной жидкости при следующих значениях, полученных опытным путем констант процесса: $K = 2.62 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}$ и $C = 1.64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{м}^2$. В момент окончания предыдущего процесса фильтрования было собрано $15,5 \text{ л}$ фильтрата с одного квадратного метра фильтрующей перегородки; свойства промывной жидкости и условия промывки идентичны свойствам фильтрата и условиям фильтрования.

Решение:

Основное уравнения фильтрования:

$$V^2 + 2CV = K\tau \quad (2.1)$$

где V – объем фильтрата, прошедшего через слой осадка за время $\tau \text{ м}^3 / \text{м}^2 \cdot \text{с}$;

K, C – константы фильтрования, соответственно $\text{м}^2 / \text{с}$ и м .

Скорость промывки осадка соответствует скорости фильтрования через слой осадка максимальной толщины, т. е. в момент окончания процесса фильтрования.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{K}{2(V_{\text{фильтрат}} + C)} = \frac{2.62 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}}{2 \cdot \left(15,5 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2} + 1,64 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2} \right)} = 7,643 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \quad (2.2)$$

Тогда время промывки:

$$t = \frac{V}{\left(\frac{dV}{dt}\right)} = \frac{0,004 \frac{M^3}{M^2}}{7,643 \cdot 10^{-6} \frac{M^3}{M^2 \cdot c}} = 523.3c = 8.72 \text{ мин}$$

Ответ: $t = 8.72 \text{ мин}$

3. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

По главе 3 задачника [2] «Теплопередача»

Общая характеристика тепловых процессов. Источники тепла и холода. Теплоносители. Теплопередача. Движущая сила тепловых процессов. Способы передачи тепла: теплопроводностью, конвекцией, теплоизлучением. Теплопроводность. Коэффициенты теплопроводности различных материалов. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Теплопроводность однослойной и многослойной стенок. Конвективный теплообмен и его связь с гидродинамической обстановкой процесса. Дифференциальное уравнение конвективного теплообмена. Условия теплового подобия: критерии Пекле, Прандтля, Нуссельта и Фурье. Критериальное уравнение конвективного теплообмена. Опытные зависимости по теплообмену при свободном движении, ламинарном и турбулентном вынужденных течениях жидкости. Теплообмен при изменении агрегатного состояния жидкости. Ядерное и пленочное кипение. Критическая тепловая нагрузка. Обобщение опытных данных по теплоотдаче при кипении. Теплоотдача при конденсации паров. Пленочная и капельная конденсации. Зависимости, выведенные Нуссельтом и Кутателедзе. Тепловое излучение. Основные понятия. Закон Стефана-Больцмана. Закон Кирхгофа. Теплоизлучение газов. Расчет лучистого теплообмена. Теплопередача. Коэффициенты теплопередачи и теплоотдачи. Теплопередача при постоянной разности температур. Теплопередача при переменной разности температур. Роль относительного движения и структуры материальных потоков – прямоток и противоток. Определение средней разности температур. Проектный и проверочный расчет теплообменника. Оптимальный расчет теплообменника. Конструкции теплообменников.

Пример

Вычислить часовую потерю холода с одного погонного метра стальной трубы диаметром 60x3 мм, изолированной слоями пробки толщиной 30 мм и совелита толщиной 40 мм. Температуры внутренней поверхности трубы -110 °С и наружной поверхности совелита 10 °С.

Решение:

Тепловой поток через изоляцию будет равен по формуле:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_n}{d_{вн}} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_1}{d_n} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (3.1)$$

где $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, $d_1=0,054$ мм;

$d_н$ – наружный диаметр трубопровода, $d_1=0,06$ мм;

d_1 – диаметр трубопровода изолированного слоем пробки толщиной 30 мм:

$$d_1 = d_н + 2 \cdot \delta_1 = 0,06 + 2 \cdot 0,03 = 0,12 \text{ м};$$

d_2 – наружный диаметр трубопровода изолированного слоем совелита толщиной 40 мм:

$$d_1 = d_1 + 2 \cdot \delta_2 = 0,12 + 2 \cdot 0,04 = 0,2 \text{ м}.$$

$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{3-1}, \lambda_{3-2}$ – теплопроводность стали, пробки, совелита соответственно, $\lambda_1 = 0,047$ Вт/(м К), $\lambda_2 = 46,5$, $\lambda_3 = 0,098$ Вт/м К, (табл. XXIII) [2]

$$Q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot (10 - (-110))}{\frac{1}{46,5} \ln \frac{0,06}{0,054} + \frac{1}{0,047} \ln \frac{0,12}{0,06} + \frac{1}{0,098} \ln \frac{0,2}{0,12}} = 37,78 \text{ Вт}$$

За час потери тепла с 1 м длины составят:

$$Q = 37,78 \cdot 3,6 = 136 \text{ Дж/ч} = 0,136 \text{ кДж/ч}$$

Ответ: $Q = 37,78 \cdot 3,6 = 136 \text{ Дж/ч} = 0,136 \text{ кДж/ч}$

4. ВЫПАРИВАНИЕ. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

По главе 4 задачника [2] «Выпаривание. Кристаллизация»

Характеристика и области применения процессов выпаривания. Однократное выпаривание. Общая схема выпарной установки. Материальный и тепловой балансы однократного выпаривания. Общая и полезная разности температур. Потери разности температур за счет концентрационной депрессии и гидростатического давления. Гидравлические потери.

Многokратное выпаривание. Сущность и преимущества процесса многokратного выпаривания. Схемы многokорпусных выпарных установок: прямоточной, противоточной, смешанной. Сравнительная характеристика установок, работающих по различным схемам. Материальный и тепловой балансы многokратного выпаривания. Потери разности температур в многokорпусной установке. Распределение полезной разности температур по корпусам, обеспечивающее равные или минимальные поверхности нагрева. Предел числа корпусов и оптимальное число корпусов в установках многokратного выпаривания. Выпаривание с тепловым насосом. Области применения выпаривания с тепловым насосом. Конструкции выпарных аппаратов.

Кристаллизация из растворов и расплавов. Способы кристаллизации. Области применения процесса. Материальный и тепловой балансы кристаллизации. Кинетика кристаллизации. Методика расчета кристаллизаторов. Устройство кристаллизаторов.

Пример

Под разрежением $0,20 \text{ кгс/см}^2$ упаривается 1500 кг/ч раствора от 8 до 36 %. Определить необходимый расход воды, подаваемой: а) в барометрический конденсатор смешения; б) в поверхностный конденсатор. В обоих случаях температура отходящего конденсата на $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (К) ниже температуры конденсации, а вода нагревается от 15 до $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение:

а) Расход воды в барометрический конденсатор определяется из уравнения теплового баланса:

$$G_B = \frac{W(i'' - c \cdot t_{\text{БК}})}{c(t_{\text{БК}} - t_{\text{ВН}})}, \quad (4.1)$$

где W – количество выпаренной воды по исходному сырью:

$$W = G_H \left(1 - \frac{x_{\text{нач}}}{x_{\text{кон}}} \right) = 1500 \left(1 - \frac{8}{36} \right) = 1166,7 \text{ кг/ч}. \quad (4.2)$$

Абсолютное давление $P_a = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}} = 1 - 0,2 = 0,8 \text{ атм}$

По уравнению (4.1):

$$G_B = \frac{1166,7(2663 - 4,19 \cdot 35)}{4,19(35 - 15)} = 34,9 \text{ кг/ч},$$

где $t_0 = 93 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура конденсации $0,8 \text{ кгс/см}^2$ (табл. ЛII) [2]

$t_{\text{кон}} = t - 5 = 93 - 5 = 88 \text{ }^\circ\text{C}$;

$i'' = 2663 \text{ кДж/кг}$ – удельная энтальпия пара $0,8 \text{ кгс/см}^2$ (табл. ЛII) [2].

Определяем объемный расход:

$$V = \frac{G}{\rho} = \frac{34,9}{997} = 35 \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (4.3)$$

где ρ – плотность жидкости при средней температуре жидкости кг/м^3

$t_{\text{cp}} = \frac{35 + 15}{2} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, тогда $\rho = 997 \text{ кг/м}^3$ (табл. XXXV) [2].

б) Расход воды в поверхностный конденсатор определяется из уравнения (4.1) теплового баланса:

$$G_B = \frac{W(i'' - i')}{c(t_{\text{БК}} - t_{\text{ВН}})} \quad G_B = W \frac{r + c(t_0 - t_{\text{кон}})}{c(t_{\text{БК}} - t_{\text{ВН}})},$$

где $r = 2278 \text{ кДж/кг}$ – удельная теплота парообразования (табл. ЛII) [2];

$c = 4,19 \text{ кДж/кг}$ – теплоемкость воды;

$$G_B = 1166,7 \frac{2278 \cdot 10^3 + 4190(93 - 88)}{4190 \cdot (35 - 15)} = 31,9 \text{ кг/ч}$$

Определяем объемный расход:

$$V = \frac{G}{\rho} = \frac{31,9}{997} = 32 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Ответ: а) $V = \frac{G}{\rho} = \frac{34,9}{997} = 35 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $G_B = 1166,7 \frac{2278 \cdot 10^3 + 4190(93 - 88)}{4190 \cdot (35 - 15)} = 31,9 \text{ кг/ч}$.

5. ОСНОВЫ МАССОПЕРЕДАЧИ. АБСОРБЦИЯ

По главе 5 задачника [2] «Основы массопередачи. Абсорбция»

Общие закономерности переноса вещества и энергии. Движущая сила и сопротивление процесса массопередачи. Фазовое равновесие, равновесные концентрации и способы выражения движущей силы диффузионных процессов. Основное уравнение массопередачи. Число единиц переноса. Число ступеней изменения рабочих концентраций. Кинетика массопередачи. Молекулярная и конвективная диффузия. Коэффициенты массоотдачи и массопередачи. Связь кинетики массопередачи с гидродинамической обстановкой.

Абсорбция. Равновесие в системах жидкость – газ. Материальный баланс. Кинетические закономерности. Принципиальные схемы процессов абсорбции. Абсорбционная аппаратура: аппараты, в которых поверхностью фазового контакта является зеркало жидкости или поверхность жидкости, растекающейся по насадке; аппараты, в которых поверхность фазового контакта развивается встречным потоком газа и жидкости; аппараты, в которых поверхность фазового контакта развивается разбрызгиванием жидкости. Расчет абсорбционной аппаратуры.

Пример

В скруббер диаметром 0,5 м подается 550 м³/ч (при 760 мм рт. ст. и 20 °С) воздуха, содержащего 2,8 % (объемная доля) аммиака, который поглощается водой под атмосферным давлением. Степень извлечения аммиака 0,95. Расход воды на 40 % больше теоретически минимального. Определить: 1) расход воды; 2) общее число единиц переноса n_{Oy} ; 3) высоту слоя насадки из керамических колец 50X50X5 мм. Коэффициент массопередачи: $K_y = 0,001$ кмоль аммиака/(м²·с кмоль аммиака/кмоль воздуха). Данные о равновесных концентрациях жидкости и газа взять из справочника.. Коэффициент смоченности насадки $\phi = 0,9$.

Решение:

Пересчитаем исходные концентрации в относительные массовые доли [2]:

$$\bar{Y}_n = \frac{\gamma_n}{1 - \gamma_n} = \frac{0,028}{1 - 0,028} = 0,0288 \text{ кмоль аммиака/кмоль воздуха}; \quad (5.1)$$

$$\gamma_k = \gamma_n(1 - c) = 0,0288(1 - 0,95) = 0,00144 \text{ кмоль аммиака/кмоль воздуха},$$

где $M_A = 17 \text{ кг/моль}$ – мольная масса аммиака [2];

$M_B = 29 \text{ кг/моль}$ – мольная масса воздуха [2];

c – степень извлечения аммиака.

Количество поглощаемого аммиака

$$M = \frac{V \cdot y_H \cdot c}{(1 - y_H) \cdot 22,4}, \quad (5.2)$$

где c – степень извлечения аммиака.

$$M = \frac{550 \cdot 0,028 \cdot 0,95}{(1 - 0,028) \cdot 22,4} = 0,672 \text{ кмоль/ч} \cdot 18 \text{ кг/кмоль} = 12,1 \text{ кг/ч.}$$

Минимальный расход поглотителя:

$$L_{\min} = \frac{M}{\bar{X}_{\gamma_n}^* - \bar{X}_n} = \frac{M}{\bar{X}_{\gamma_n}^*}, \quad (5.3)$$

где $\bar{X}_{\gamma_n}^*$ – концентрация аммиака в воде, равновесная с газом начального состава; определяем из уравнения равновесной прямой;

$$\bar{X}_{\gamma_n}^* = 0,0223 \text{ (при } \bar{Y}_n = 0,0288 \text{ кмоль аммиака/кмоль воздуха).}$$

По данным [2]:

Таблица 5.1 – Справочные данные

x	y	y^*	$y - y^*$	$\frac{1}{y - y^*}$
0	0,003	0	0,003	333
0,005	0,0097	0,0045	0,0052	193
0,010	0,0165	0,0102	0,0063	159
0,0125	0,0200	0,0138	0,0062	161
0,015	0,0234	0,0183	0,0051	196
0,020	0,0300	0,0273	0,0027	371

$$L_{\min} = \frac{12,1}{0,0223} = 542,85 \text{ кг/ч}$$

Фактический расход воды

$$L = L_{\min} \cdot \varphi = 542,85 \cdot 1,4 = 760 \text{ кг/ч,} \quad (5.4)$$

где $\varphi = 1,4$ (при 40 % больше теоретически минимального).

Определяем общее число единиц переноса n_{oy} .

По графику (рис. 5.1) площадь от \bar{Y}_n до \bar{Y}_k будет равна n_{oy} , также можно записать выражением:

$$n_{oy} = \int_{Y_k=0,00144}^{Y_n=0,0288} \frac{dY}{Y - Y^*} = 4,68 \quad (5.5)$$

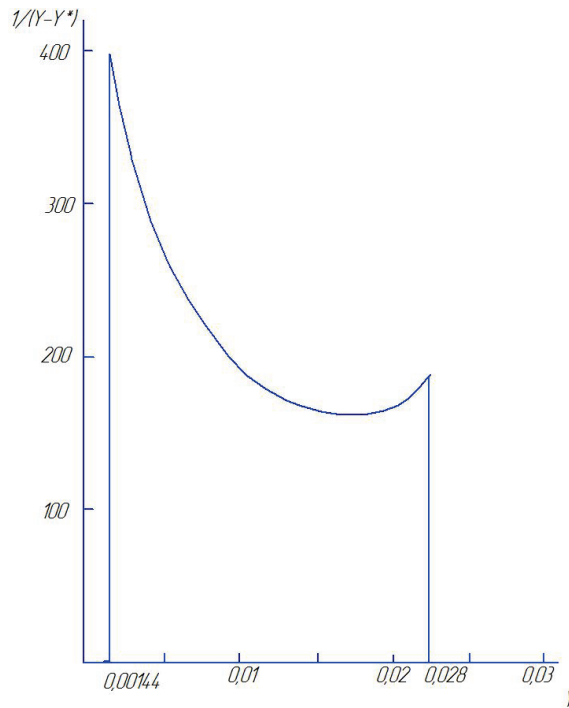


Рис. 5.1. Зависимость на основе данных табл. 5.1.

Определяем высоту слоя насадки из керамических колец 50X50X5 мм

$$H = n_{oy} \cdot h_{oy} , \quad (5.6)$$

где h_{oy} – высота единиц переноса для газовой фазы.

$$h_{oy} = \frac{G}{K_y \cdot S \cdot \sigma \cdot \psi} , \quad (5.7)$$

где K_y – коэффициент массопередачи: $K_y = 0,001$ кмоль аммиака/($m^2 \cdot c$ кмоль аммиака/кмоль воздуха).

$$K_y = \frac{K_y \cdot M_{NH_3}}{M_{NH_3} / M_{воз}} = \frac{0,001 \cdot 17}{17 / 29} = 0,0288 \text{ кг}/(m^2 \cdot c) , \quad (5.8)$$

где $M_{NH_3} = 17 \text{ кг}/\text{моль}$ – мольная масса аммиака;

$M_{воз} = 29 \text{ кг}/\text{моль}$ – мольная масса воздуха;

S – площадь поперечного сечения колонны m^2 :

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 0,196 m^2 ,$$

где σ – удельная поверхность сухой насадки, $\sigma = 87,5 m^2/m^3$, (табл. XVII) [2] для насадки из керамических колец 50X50X5 мм;

ψ – коэффициент смачиваемости насадки, $\psi = 0,9$;

G – массовый расход газа, кг/ч:

$$G = V \cdot \rho_\gamma = 550 \cdot 1,2 = 660 \text{ кг/ч};$$

$$\rho_\gamma = \rho_0 \cdot \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot 1}{293 \cdot 1} = 1,2 \text{ кг/м}^3,$$

где $\rho_\gamma = 1,29 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха при 0°C [2];

$$h_{oy} = \frac{660}{0,0288 \cdot 0,196 \cdot 87,5 \cdot 0,9 \cdot 3600} = 0,412 \text{ м}$$

Подставляем в формулу (5.6) высоты насадки:

$$H = 4,68 \cdot 0,412 = 1,93 \text{ м.}$$

Ответ: 1) $L = L_{\min} \cdot \varphi = 542,85 \cdot 1,4 = 760 \text{ кг/ч}$; 2) $n_{oy} = \int_{Y_k=0,00144}^{Y_H=0,0288} \frac{dY}{Y - Y^*} = 4,68$;

3) $H = 4,68 \cdot 0,412 = 1,93 \text{ м.}$

6. ПЕРЕГОНКА И РЕКТИФИКАЦИЯ

По главе 6 задачника [2] «Перегонка и ректификация»

Равновесие в системах пар – жидкость. Процессы разделения жидких смесей, основанные на испарении: простая перегонка, перегонка с водяным паром, молекулярная перегонка. Физическая сущность ректификации. Материальный баланс. Флегмовое число. Тепловой баланс. Кинетика ректификации. Ректификация многокомпонентных смесей и ее особенности. Принципиальные схемы процессов ректификации. Аппаратура, применяемая для проведения ректификации и принципы ее расчета.

Пример

В ректификационной колонне непрерывного действия разделяют 2 т/час бинарной смеси, содержащей равные массовые количества компонентов. Расход флегмы 1500 кг/час. В кубовом остатке содержится 99 % высококипящего компонента. Флегмовое число равно 1,5. Определить расход кубового остатка и состав дистиллата.

Решение:

Здесь по условию задачи все задается в массовых долях и расходы килограммы в час. Поскольку материальный баланс может быть составлен через массовые доли и найти необходимо расходы, то переводить ничего не нужно.

$$R = \Phi/R \rightarrow R = \Phi/R = 1500/1,5 = 1000 \text{ кг/час}$$

Из материального баланса определим расход кубового остатка:

$$F = R + W$$

$$W = 2000 - 1000 = 1000 \text{ кг/час}$$

А из уравнения материального баланса по содержанию низкокипящего компонента определим состав дистиллата:

$$F \cdot x_F = P \cdot x_P + W \cdot x_W$$

$$\bar{x}_p = (F\bar{x}_F - W\bar{x}_W) / P = (2000 \cdot 0,5 - 1000 \cdot 0,01) / 1000 = 0,99$$

$$\bar{x}_p = 99 \% \text{ (по НК).}$$

Ответ: $\bar{x}_p = 99 \% \text{ (по НК)}$.

7. ЭКСТРАГИРОВАНИЕ

По главе 7 [2] «Экстрагирование»

Экстрагирование из капиллярно-пористых тел. Кинетика процесса переноса в капиллярно-пористых телах. Внешняя и внутренняя диффузия. Роль гидродинамической обстановки процесса. Физические основы и закономерности процесса. Аппаратурное оформление процесса экстракции. Применение механических колебаний. Растворение твердых тел.

Экстракция в системе жидкость – жидкость. Характеристика процесса и области его применения. Физические основы и принципы выбора экстрагента. Фазовое равновесие в системах жидкость – жидкость. Расчет процесса экстракции. Методы регенерации экстрагентов. Конструкции экстракторов.

Пример

0,1 моль спирта распределяется между 300 мл воды и 500 мл CCl_4 . Найти концентрации спирта (моль/л) в равновесных растворах. Коэффициент распределения этилового спирта между четыреххлористым углеродом и водой равен 0,0244.

Решение:

По закону распределения: $\frac{C_1}{C_2} = K$,

где C_1 – концентрация растворённого вещества в первом растворителе (CCl_4);

C_2 – концентрация растворённого вещества во втором растворителе (H_2O);

K – коэффициент распределения.

Число молей спирта, перешедшего в четыреххлористый углерод, обозначим через X , тогда:

$$C_1 = \frac{X \cdot 100}{500}$$

В воду перейдет оставшееся количество спирта, равное $(0,1 - X)$ кмоль,

следовательно: 0,1

$$C_2 = \frac{(0,1 - X) \cdot 1000}{300}$$

Подставив C_1 и C_2 в уравнение, получим:

$$\frac{X \cdot 300}{500 \cdot (0,1 - X)} = 0,0244$$

Откуда $X = 0,0039$ кмоль.

Ответ: $C_1 = \frac{0,0039 \cdot 1000}{500} = 0,007$ кмоль/м³, $C_2 = \frac{0,0961 \cdot 1000}{300} = 0,3203$ кмоль/м

8. АДСОРБЦИЯ

По главе 8 [2] «Адсорбция»

Равновесие в процессах адсорбции. Кинетические закономерности. Принципиальные схемы процессов адсорбции. Адсорбционная аппаратура: аппараты для работы с неподвижным адсорбентом, аппараты для работы с движущимся зернистым адсорбентом, аппаратура для работы с псевдоочищенным адсорбентом. Расчет адсорбционной аппаратуры.

Пример

Рассчитать равновесные количества хлористого этила, адсорбированные 20 кг активированного угля при температурах 20 и -15 °С и одинаковом парциальном давлении парообразного хлористого этила в воздухе, $p = 0,162$ кгс/см². Равновесие описывается изотермой Ленгмюра с параметрами: $a_m^* = 0,55$ кг/кг угля; $b_{20} = 0,013$ и $b_{-15} = 0,12$ (мм рт. ст.)⁻¹.

Решение:

Значение парциального давления хлористого этила переводится в размерность, соответствующую размерности параметров b : $p = 0,162 \cdot 760 / 1,033 = 119$ мм рт. ст. По уравнению:

$$\frac{a_t^*}{a_m^*} = \frac{b \cdot p}{1 + b \cdot p}$$

изотермы Ленгмюра находятся удельные количества адсорбата, поглощенные единицей адсорбента: $a_{20}^* = 0,55 \cdot 0,013 \cdot 119 / (1 + 0,013 \cdot 119) = 0,338$ кг/кг угля;
 $a_{-15}^* = 0,55 \cdot 0,12 \cdot 119 / (1 + 0,12 \cdot 119) = 0,514$ кг/кг угля.

Ответ: Таким образом, 20 кг активированного угля в равновесном состоянии будет поглощено хлористого этила: при 20 °С $a^* = 0,338 \cdot 20 = 6,76$ кг; при -15 °С $a^* = 0,514 \cdot 20 = 10,3$ кг.

9. ТЕРМИЧЕСКАЯ СУШКА

По главе 9 [2] «Термическая сушка»

Сушка. Способы тепловой сушки. Равновесная влажность и связь влаги с материалом. Материальный и тепловой балансы сушки. Теплофизические свойства влажных газов. Y-x диаграмма для воздуха и дымовых газов. Изображение процессов сушки на Y-x диаграмме. Принципиальные схемы процессов сушки. Механизм и кинетические закономерности сушки. Периоды сушки: сушка с постоянной скоростью, сушка с уменьшающейся скоростью. Закономерности, позволяющие определить необходимую поверхность фазового контакта или время сушки для различных периодов. Контактная сушка. Сушилки и принципы их расчета: вальцовые сушилки, камерные сушилки, туннельные сушилки, распылительные сушилки, барабанные сушилки, ленточные сушилки, петлевые сушилки, пневматические сушилки, сушилки со взвешенным слоем материала, сушильная часть бумагоделательной машины.

Пример

Вычислить среднее значение потенциала сушки в теоретической сушилке, где влага испаряется при температуре мокрого термометра. Параметры воздуха перед калорифером: $t_0=20$ °С и $\varphi_0=70$ %, а после сушилки: $t_2=50$ °С и $\varphi_2=40$ %.

Решение:

Средний потенциал сушки определяем по формуле:

$$x_{cp} = \frac{(t_1 - t_M) - (t_2 - t_M)}{2,3 \lg \frac{(t_1 - t_M)}{(t_2 - t_M)}};$$

где $t_1=108$ °С – температура в точке 1 (рис. 9.1);

t_M – температура мокрого термометра (рис. 9.1).

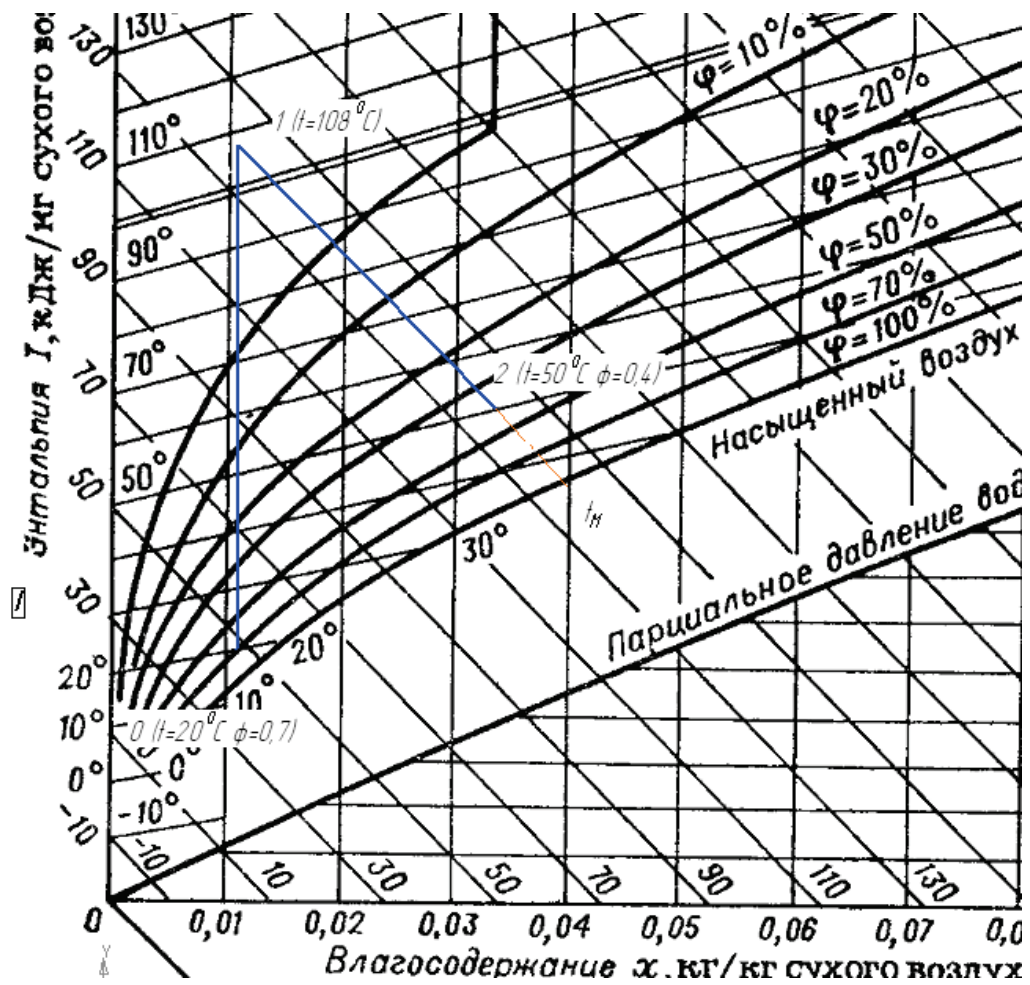


Рис. 9.1. Диаграмма Рамзина

Ответ: $x_{cp} = \frac{(108-38)-(50-38)}{2,3 \lg \frac{(108-38)}{(50-38)}} = 35,8^\circ C$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Процессы и аппараты химической технологии [Текст]: учебник/ В. Г. Анштейн, М. К. Захаров и др. – БИНОМ: Лаборатория знаний, 2014. – 1759 с. (ЭБС“IPRbooks”: Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/9103>.)
2. Романков П. Г., Фролов В. Ф., Флисюк О. М. Методы расчета процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2017. – 544 с. (ЭБС“IPRbooks”: Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67350>.)
3. Мидуков, Н. П. Гидродинамика волокнистых суспензий: учеб. пособие / Н. П. Мидуков, В. С. Куров; М-во науки и высшего образования РФ, С.-Петерб. гос. ун-т пром. технологий и дизайна, Высш. шк. технологии и энергетики. – Санкт-Петербург : ВШТЭ СПбГУПТД, 2020. – 88 с. – ISBN 978-5-91646-222-7. – Текст : электронный. Режим доступа: <http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/1604025416.pdf>
4. Бутко, Г. Ю. Механика жидкости и газа [Текст]: учебное пособие / Г. Ю. Бутко, А. О. Никифоров; М-во образования и науки РФ, ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 100 с. Режим доступа: http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/2018_05_26_01_v2.pdf
5. Мидуков, Н. П. Процессы и аппараты химической технологии [Текст] : учебно- практическое пособие для самостоятельной работы студентов / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, А. О. Никифоров; М-во образования и науки РФ, ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2017. – 95 с. Режим доступа: <http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/4.pdf>
6. Мидуков, Н. П. Массообменные процессы в целлюлозно-бумажной промышленности [Текст] : учеб. пособие / Н.П. Мидуков, В.С. Куров, А.О. Никифоров; М-во образования и науки РФ, СПбГТУРП. – СПб.: СПбГТУРП, 2015. – 125 с.: ил. 22. Режим доступа: <http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/2.pdf>
7. Мидуков, Н. П. Сборник кейсов по дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии» [Текст] : учебно-практическое пособие / Н. П. Мидуков, В. С. Куров, А. О. Никифоров; М-во образования и науки РФ, ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 98 с. Режим доступа: http://nizrp.narod.ru/metod/kafpriapxt/2018_10_03_01.pdf

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ
ИНСТИТУТ ЗАОЧНОГО И ВЕЧЕРНЕГО ОБУЧЕНИЯ**

заочная форма обучения

Направление _____ Шифр _____ Группа _____

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № _____

По дисциплине «Процессы и аппараты химической технологии»

Студента _____ курса _____

(Фамилия, Имя, Отчество)

Дата и номер регистрации работы _____

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

ИНСТИТУТ ЗАОЧНОГО И ВЕЧЕРНЕГО ОБУЧЕНИЯ

Контрольная работа

по дисциплине

«Технологические процессы и аппараты в химической отрасли»

Выполнил

студент учебной группы №

шифр

(фамилия, имя, отчество)

Проверил

(должность, фамилия, имя, отчество)

Санкт-Петербург

2023

ЗАДАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ
Студентам направлений 15.03.02

№ ВАРИАНТА	№ ЗАДАЧИ						
0	1.52	2.24	3.34	4.22	5.12	6.1	9.10
1	1.53	2.25	3.35	4.23	5.13	6.2	9.9
2	1.54	2.27	3.36	4.24	5.14	6.3	9.8
3	1.56	2.29	3.37	4.1	5.16	6.4	9.7
4	1.57	2.31	3.38	4.2	5.17	6.5	9.6
5	1.58	2.32	3.39	4.3	5.18	6.6	9.5
6	1.59	2.33	3.40	4.4	5.19	6.7	9.4
7	1.60	2.35	3.41	4.5	5.20	6.8	9.3
8	1.61	2.36	3.42	4.6	5.21	6.9	9.2
9	1.62	2.37	3.43	4.7	5.22	6.10	9.1

Номер варианта по последней цифре зачетной книжки.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Требования к оформлению контрольных работ для студентов очных отделений и заочников неспроста заслуживают особого внимания, ведь любая работа должна быть выполнена по ГОСТу. Основные нормы следующие: контрольную печатают на бумаге белого цвета формата А4. Шрифт 14 пт Times New Roman или Arial, интервал между строками 1 или 1,5. Отступ абзаца по всей работе соблюдается одинаковый. Для этого можно использовать клавишу Tab.

Важно соблюдать пропорции при оформлении контрольной работы на каждой странице. Для этого выбирают правильные размеры полей:

с левой стороны – 30 мм;

с правой – 20 мм;

верхнее и нижнее поля – 20 мм.

Все страницы должны быть пронумерованы. Титульная страница считается первой, но номер на ней не ставится. В соответствии с правилами оформления контрольной работы номер страницы рекомендуется указывать сверху по центру.

Обычно работы сдаются на проверку примерно за месяц до начала сессии, в зависимости от формата сессии сроки сдачи и правила могут быть изменены. Обязательно начинайте работать над контрольной заранее, не затягивайте с решением до последних дней. Полезно уточнить формат сдачи (в тетради бандеролью по почте, файл решения электронным письмом на почту кафедры *.doc, *.pdf или изображения и т. д.). В случае проведения сессии в дистанционном формате формат приема контрольной работы будет указан преподавателем через систему Moodle – контрольная работа загружается в соответствующий раздел (для загрузки контрольных работ) дисциплины «Технологические процессы и аппараты в химической отрасли» и в этом случае используется формат *.pdf (единый файл со всеми страницами).

Внимательно отнеситесь к номеру задания: номер варианта выбирается по последней цифре зачетной книжки. При неверном выборе варианта задание не будет зачтено.

Переписывайте условия задач в порядке их расположения в методических указаниях.

Выделяйте структуру в работе: обозначения «задание», «решение» и «ответ».

При расчете применяйте физические величины, выраженные в Международной системе единиц (СИ).

В меру подробно изложите решение задачи согласно приведенным примерам.

Проверяйте ответ, если возможно, в программах или онлайн-сервисах. Это не замена полноценного решения, а гарантия верности.

Если графики или вычисления нужны в определенной программе (Excel, Mathcad и т.п.), делать именно в ней.

Работа должна содержать титульный лист, решения и список использованной литературы. После выполнения работы добавьте содержание, если работа большая; список литературы, если требуется; расставьте переносы слов и начала новых страниц; проверьте суть ответа на теоретические вопросы (если они есть); проставьте автонумерацию страниц.

Критерии оценки контрольной работы

Контрольная работа оценивается преподавателем отметками «зачтено» или «не зачтено». В случае отметки «не зачтено» за контрольную работу преподаватель в письменном формате на титульном листе или в НДОТ оставляет комментарии по недочетам, допущенным студентом.

Работу с исправлениями, если по срокам успеваете, например, если работа отправлена в системе Moodle, снова загружаете в соответствующий раздел или приносите на занятие.

Успешное выполнение контрольной работы и зачетные лабораторные работы (если они присутствуют в плане дисциплины) являются условием допуска к зачету/экзамену. Контрольная работа оценивается преподавателем отметками «зачтено» или «не зачтено». В случае отметки «не зачтено» за контрольную работу преподаватель в письменной форме на титульном листе или в НДОТ оставляет комментарии по недочетам, допущенным студентом.