

Министерство образования Российской Федерации
Восточно-Сибирский Государственный
технологический университет

ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ
Рабочая программа, методические указания и контрольные
задания для студентов – заочников
специальности 0701.00 – Биотехнология

Составитель: Николаев Г. И.

Улан-Удэ, 2001

БК 20.18

Исполнитель: Николаев Г. И.

Методические указания по курсу «Процессы и аппараты химической технологии», / Г. И. Николаев /, Улан-Удэ, 2001,

Программа курса, рассчитанная на подготовку химика – технолога широкого профиля, охватывает все типовые процессы химической технологии с точки зрения их теоретического обоснования, выбора оптимальных параметров, методики расчета и аппаратного оформления. Цель курса – научить студента рациональному выбору конструкции и научному расчету машин и аппаратов для определенных биотехнологических процессов, а также методам целесообразной промышленной эксплуатации этого производственного оборудования для достижения максимальной производительности при минимальных затратах.

ISBN 5-89230-066-8

© Николаев Г. И.
2001 г.

ВВЕДЕНИЕ

Программа курса, рассчитанная на подготовку химика – технолога широкого профиля, охватывает все типовые процессы химической технологии с точки зрения их теоретического обоснования, выбора оптимальных параметров, методики расчета и аппаратного оформления. Цель курса – научить студента рациональному выбору конструкции и научному расчету машин и аппаратов для определенных биотехнологических процессов, а также методам целесообразной промышленной эксплуатации этого производственного оборудования для достижения максимальной производительности при минимальных затратах.

Курс состоит из трех разделов:

1. Гидродинамические и механические процессы.
2. Тепловые процессы.
3. Диффузионные процессы.

Прежде всего следует уяснить сущность и задачи курса, а затем приступить к изучению его в той последовательности, которая изложена в программе.

Каждую тему надо сначала прочитать по учебнику (используя конспекты обзорных лекций), чтобы получить общее представление о ней. После этого разобрать примеры, которые есть в учебнике, затем ответить на вопросы для самопроверки, приведенные в методических указаниях.

Условия каждого задания должны быть написаны четко. В тексте решений надо приводить краткие пояснения перед каждым вычислением. Если требуется привести схему, то сначала надо ее нарисовать, а затем написать к ней краткое исчерпывающее объяснение.

При решении задач сначала приводится формула, затем выписываются все величины, входящие в нее, после этого в формулу подставляются цифры и определяется искомая величина с указанием ее размерности.

В заключение выполняется курсовой проект по теме, выданной преподавателем. При выполнении курсового проекта следует использовать методические указания к курсовому проектированию.

Рабочая программа, методические указания и вопросы для самопроверки.

I. Гидродинамические и механические процессы.

Тема 1. Основы гидравлики.

Некоторые физические свойства жидкостей. Понятие капельной и упругой жидкостей.

Гидростатика. Гидростатическое давление. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости Эйлер. Основное уравнение гидростатики. Практические приложения основного уравнения гидростатики. Приборы, измеряющие гидростатические давления.

Гидродинамика. Вязкие и невязкие жидкости. Вязкость жидкостей и газов. Закон Ньютона. Динамический и кинематический коэффициенты вязкости.

Режимы движения вязкой жидкости. Число Рейнольдса. Понятие ламинарного и турбулентного характера движения жидкости. Уравнение расхода. Уравнение сплошности или неразрывности потока. Дифференциальные уравнения движения жидкости Эйлера.

Уравнение Бернулли. Физические смыслы уравнения Бернулли. Уравнение Бернулли для целого потока реальной жидкости. Потери энергии по длине трубопровода. Формула Вейсбаха-Дарси. Коэффициент Дарси. Потери энергии при транспортировании жидкостей и газов по трубам. Практические приложения уравнения Бернулли.

Гидравлический расчет трубопроводов: простых и сложных, длинных и коротких.
Истечение жидкости через отверстия и насадки.

Движение жидкостей через неподвижные зернистые и пористые слои. Гидродинамика кипящих (псевдосжиженных) зернистых слоев. Элементы гидродинамики двухфазных потоков. Барботаж. Структура потоков и распределение времени пребывания жидкости в аппаратах: идеальное вытеснение и идеальное смешение.

Тема 2. Перемещение жидкостей (насосы).

Классификация насосов.

Центробежные насосы. Уравнение Эйлера. Предельная высота всасывания. Формулы пропорциональности. Рабочие характеристики насосов. Работа центробежного насоса на сеть. Параллельное и последовательное соединение насосов.

Устройства для перемещения жидкостей посредством пара, воды и сжатого воздуха (газа). Пароструйные насосы. Водоструйные насосы. Монтежю. Газлифты. Сифоны.

Поршневые насосы. Насосы простого и многократного действия. Диаграмма подачи насоса. Предельная высота всасывания. Потери напора на преодоления сил инерции. Воздушные колпаки. Индикаторная диаграмма. Общая характеристика поршневых насосов. Конструкции поршневых насосов.

Тема 3. Перемещение и сжатие газов.

Классификация машин для сжатия и перемещения газов.

Поршневые компрессоры. Индикаторная диаграмма компрессора. Коэффициент подачи и предел сжатия. Многоступенчатое сжатие. Мощность, потребляемая компрессором. Основные типы и конструкции поршневых компрессоров.

Вакуум-насосы. Основные конструкции: поршневые, ротационные, водокольцевые и масляные, водо- и пароструйные.

Вентиляторы. Центробежные вентиляторы. Рабочие характеристики. Осевые вентиляторы.

Газгольдеры. Мокрые и сухие газгольдеры низкого давления. Газгольдеры высокого давления.

Тема 4. Разделение газовых и жидких неоднородных систем.

Классификация неоднородных систем.

Отстаивание и декантация. Производительность отстойников. Конструкции отстойных аппаратов периодического и непрерывного действия.

Фильтрация. Характеристика работы фильтра. Характеристика осадков. Уравнение фильтрации. Определение констант фильтрации.

Фильтры периодического действия. Нутч-фильтры. Фильтрпрессы. Листовые и патронные фильтры. Вакуум-фильтры непрерывного действия: барабанные, дисковые, тарельчатые, ленточные. Фильтры непрерывного действия, работающие под давлением.

Центрифугирование. Фактор разделения. Классификация центрифуг. Давление на стенку барабана. Скорость фильтрации и осаждения при центрифугировании. Расход энергии.

Центрифуги периодического, полунепрерывного и непрерывного действия. Сепараторы. Трубчатые сверхцентрифуги.

Гидроциклоны.

Очистка газов под действием силы тяжести. Конструкции пылеосадительных камер. Очистка газов под действием центробежной силы. Конструкции циклонов.

Стерилизация воздуха. Теоретические основы осаждения аэрозолей. Седиментация аэрозолей на горизонтальных волокнах. Электростатическое притяжение. Действие Ван-дер-ваальсовых сил. Проектирование и эксплуатация аэрозольного фильтра. Технологическая

схема получения стерильного сжатого воздуха. Аэрозольный фильтр конструкции Гипромедпрома.

Тема 5. Перемешивание в жидкой среде при ферментации.

Перемешивание в процессе ферментации. Выбор мешалок. Влияние циркуляции жидкости в сосуде на аэрацию. Влияние турбулентного движения на массопередачу. Выбор диаметра мешалки и скорость ее вращения. Расход энергии на перемешивание жидкости. Расход на перемешивание в системе газ – культуральная жидкость. Регулирование аэрации и перемешивания. Передача крутящего момента от двигателя к мешалке. Конструкции ферментаторов, основанные на других методах аэрации и перемешивания. Перемешивание сжатым воздухом и паром (барботирование).

Литература: /1/, /2/, /3/, /4/.

II. Тепловые и диффузионные процессы.

Тема 1. Теплопередача в биотехнологических процессах.

Механизм процесса теплообмена. Основные уравнения теплообмена: теплоотдачи, теплопроводности и теплопередачи. Коэффициенты теплообмена, их физические смыслы.

Теплоотдача при вынужденном и свободном движении. Теплоотдача при кипении жидкостей и конденсации паров.

Теплоотдача при непосредственном соприкосновении теплоносителей (в кипящем слое и скрубберах).

Теплоотдача при постоянных и переменных температурах. Выбор направления потока теплоносителей. Средняя разность температур. Определение теплообменной поверхности тепловых аппаратов.

Тема 2. Нагревание и охлаждение при стерилизации питательных сред.

Источники тепла, методы нагревания и их технико-экономическая характеристика. Нагревание водяным паром, топочными газами, минеральными маслами, водой, органическими теплоносителями, расплавленными солями и металлами. Нагревание электрическим током.

Охлаждающие агенты, способы охлаждения и конденсации. Охлаждение до обычных и низких температур. Конденсация паров.

Стерилизация питательных сред. Влияние температуры на скорость процесса. Выбор температуры стерилизации питательной среды. Схема подготовки питательной среды. Нагреватель. Выдерживатель. Холодильник. Регенераторы.

Гидравлическое сопротивление теплообменных аппаратов.

Тема 3. Выпаривание.

Технические методы выпаривания: выпаривание с непосредственным газовым обогревом, выпаривание с глухим паровым и газовым обогревом.

Однокорпусное выпаривание. Общая схема вакуум-выпарной установки с вспомогательным оборудованием. Назначение барометрического конденсатора и вакуум-насоса. Влияние накипи на производительность выпарного аппарата. Повышение коэффициента теплопередачи за счет организованной циркуляции раствора.

Материальный и тепловой балансы выпарной установки. Расход греющего пара.

Непрерывное и периодическое выпаривание в однокорпусных выпарных аппаратах. Понижение упругости паров над растворами (температурная депрессия). Влияние гидроста-

тического давления. Гидравлическое сопротивление паропроводов вторичного пара. Расчет температуры кипения раствора. Общая и полезная разности температур.

Многокорпусное выпаривание. Методы повышения экономичности процесса выпаривания. Типовые схемы многокорпусных выпарных аппаратов: прямоточный и противоточный с параллельным питанием корпусов, их сравнительная характеристика. Использование вторичного пара.

Методы расчета многокорпусной выпарной установки. Распределение нагрузки по корпусам. Тепловой баланс многокорпусной выпарной установки. Определение поверхности нагрева отдельных корпусов. Распределение полезной разности температур. Оптимальное число корпусов. Конструкции выпарных аппаратов. Выпарные аппараты с естественной и принудительной циркуляцией раствора. Пленочные выпарные аппараты.

Выпаривание с тепловым насосом. Схема установки. Изображение процесса на диаграмме “Т – S”. Расход пара и электроэнергии на выпаривание. Область применения.

Литература: /1/, /2/, /3/, /4/.

III. Диффузионные процессы.

Тема 1. Массопередача.

Общая характеристика диффузионных процессов. Типовые случаи массообмена.

Статика процесса. Фазовые равновесия. Построение диаграмм фазового равновесия. Уравнение линии рабочих концентраций.

Кинетика процесса. Молекулярная диффузия. Турбулентный перенос. Движущая сила диффузионных процессов. Общее уравнение массопередачи. Уравнение массопередачи для насадочных диффузионных аппаратов. Общее число единиц переноса. Ступени изменения концентраций. Графический расчет тарельчатых аппаратов.

Дифференциальное уравнение конвективного переноса веществ. Подобие диффузионных процессов. Критериальные уравнения.

Тема 2. Перегонка и ректификация.

Перегонка с водяным паром. Определение температуры перегонки. Расход пара. Степень насыщения водяного пара парами перегоняемого вещества.

Перегонка под вакуумом.

Простая перегонка. Материальный баланс.

Ректификация. Периодическая и непрерывная ректификация. Уравнения линий рабочих концентраций для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны. Построение линий рабочих концентраций. Число ступеней изменения концентраций. Зависимости между количеством флегмы, числом тарелок, расходом греющего пара и производительностью колонны.

Определение основных размеров тарельчатых ректификационных колонн. Метод расчета ректификационных колонн. Метод расчета ректификационных колонн при помощи тепловой диаграммы. Тепловой баланс ректификационной колонны.

Оптимальный гидродинамический режим работы насадочных колонн. Определение основных размеров насадочных ректификационных колонн.

Конструкции ректификационных колонн. Тарельчатые колонны. Колпачковые и сетчатые тарелки. Центробежные пленочные ректификационные аппараты. Насадочные колонны.

Гидравлическое сопротивление колонных аппаратов.

Специальные методы перегонки. Молекулярная дистилляция. Экстрактивная и азеотропная ректификации.

Понятие о ректификации многокомпонентных смесей.

Тема 3. Абсорбция.

Общие характеристики процесса. Выбор абсорбента.

Материальный баланс абсорбера. Удельный расход абсорбента. Влияние температуры и давления на процесс абсорбции. Расчет абсорберов для определения их геометрических параметров: диаметра и высоты. Конструкции абсорберов.

Специальные способы абсорбции при поглощении кислорода питательной средой. Массопередача кислорода. Барботаж газа. Влияние перемешивания на барботаж. Влияние движущей силы на скорость абсорбции кислорода.

Тема 4. Пенообразование и пеногашение.

Роль пенообразования. Коллоидно-химические основы пенообразования. Кинетика пенообразования. Пеногашение. Брызгоунос.

Тема 5. Экстрагирование.

Общая характеристика процесса. Области применения экстракций. Экстрагирование из растворов. Принципы выбора растворителя. Фазовое равновесие. Диаграммы равновесия. Экстракция с перекрестным током. Противоточная экстракция. Понятие об экстракции с возвратом и двумя растворителями.

Графические методы расчета экстракционных аппаратов. Кинетика процессов экстракции в системе жидкость-жидкость.

Типы экстракторов для жидкостной экстракции и их сравнительная характеристика.

Особенности процесса экстрагирования из твердых тел. Тип и конструкции экстракторов для извлечения веществ из твердых тел.

Тема 6. Адсорбция.

Общая характеристика процесса адсорбции и области применения. Статическая и динамическая активность адсорбентов. Изотермы адсорбции. Скорость адсорбции. Адсорбция во взвешенном и текущем слое. Промышленные адсорбенты и их характеристика. Конструкции адсорберов и схемы адсорбционных установок периодического и непрерывного действия. Адсорберы со взвешенным и текущим слоем адсорбента.

Тема 7. Сушка.

Общая характеристика процесса. Состояние влаги в материале. Основные методы сушки.

Сушка воздухом и топочными газами. Общая схема установки.

Статика сушки. Основные параметры влажного воздуха «I-x» диаграммы Рамзина.

Материальный и тепловой балансы воздушной сушилки. Удельные расходы воздуха и тепла. Изображение и анализ основных вариантов сушильного процесса для теоретической и действительной сушилки на диаграмме Рамзина. Температура мокрого термометра и точка росы. Сушильный потенциал и его выражения.

Кинетика сушки. Механизм процесса сушки. Опытные кривые сушки. Критическое влагосодержание. Периоды постоянной и падающей скорости процесса сушки. Расчетные уравнения процесса сушки.

Конструкция сушилок. Камерные сушилки. Сушилки непрерывного действия: туннельные, ленточные, барабанные, пневматические со взвешенным слоем, распылительные, вальцовые и петлевые.

Сушка под вакуумом. Схема вакуум-сушильной установки. Преимущества и недостатки сушки под вакуумом. Конструкции вакуум-сушилок.

Сушка инфракрасными лучами. Сушка токами высокой частоты. Сублимационная сушка.

Литература: /1/, /2/, /3/, /4/.

Контрольное задание 1

Но- мер вари- анта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Но- мер во- проса	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	19	20	17	18	15	16	13	14	11	12
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	31	32	33	33	34	35	36	37	38	39
	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49

Контрольные вопросы.

1. Некоторые физические свойства жидкостей. Плотность и удельный вес. Гидростатическое давление. Вязкость.
2. Гидростатика. Дифференциальные уравнения равновесия Эйлера.
3. Основное уравнение гидростатики.
4. Некоторые практические приложения основного уравнения гидростатики: сообщающиеся сосуды, гидрозатвор, закон Паскаля и Архимеда, гидростатические машины, пневматическое измерение количества жидкости в резервуарах.
5. Приборы, измеряющие гидростатическое давление: пьезометры, U - образники, микроманометры, механические манометры, вакууметры.
6. Атмосферное, избыточное и абсолютное давления. Вакуум. Какое давление фиксирует механический манометр.
7. Гидродинамика. Основные характеристики движения жидкостей: скорость и расход жидкости, гидравлический радиус и эквивалентный диаметр, установившийся и неустановившийся потоки.
8. Режимы движения жидкости. Число Рейнольдса. Профиль скоростей при ламинарном и турбулентном движении жидкости по трубопроводу.
9. Дифференциальные уравнения движения Эйлера. Уравнение неразрывности (сплошности) потока.
10. Уравнение Бернулли элементарной струйки идеальной жидкости.
11. Уравнение Бернулли целого потока реальной жидкости.
12. Некоторые практические приложения уравнения Бернулли: пневмометрическая трубка Пито-Прандтля, мерная диаграмма, трубка Вентури, истечение жидкостей из сосуда.
13. Потери энергии по длине трубопровода и на местные сопротивления. Уравнение Вейсбаха-Дарси. Коэффициент Дарси. Формула Альштуля.
14. Зависимость коэффициента сопротивления по длине трубопровода λ (коэффициента Дарси) от скорости (от числа Рейнольдса). Понятие гладких труб.
15. Гидравлический расчет трубопроводов: при различных диаметрах трубопровода, параллельном соединении трубопроводов, разветвлении для длинных и коротких трубопроводов.
16. Перемещение жидкостей. Классификация лопастных машин.
17. Центробежные насосы. Уравнение центробежного насоса. Характеристики центробежного насоса.

18. Основные параметры насосов. Напор насоса. Высота всасывания. Явление кавитации в насосах. Коэффициент быстроходности центробежного насоса.
19. Совместная работа центробежных насосов: при параллельном и последовательном соединении.
20. Поршневые насосы. Принцип действия и типы насосов. Производительность. Характеристика насосов.
21. Индикаторная диаграмма работы поршневого насоса.
22. Специальные типы поршневых и центробежных насосов.
23. Насосы других типов: пропеллерные (осевые), вихревые, шестеренчатые, винтовые, одновинтовые (героторные), пластинчатые, струйные, монтежю, воздушные подъемники (эрлифты).
24. Перемещение и сжатие газов. Компрессорные машины. Термодинамические основы процесса сжатия газов. T-S – диаграмма.
25. Работа сжатия и потребляемая мощность.
26. Типы компрессоров. Индикаторная диаграмма. Индикаторная мощность и индикаторное давление.
27. Производительность компрессоров. Коэффициент подачи. Объемный коэффициент.
28. Ротационные компрессоры и газодувки: пластинчатые, водокольцевые, газодувки.
29. Осевые вентиляторы и компрессоры. Винтовые компрессоры. Вакуум-насосы.
30. Разделение неоднородных систем. Классификация неоднородных гетерогенных систем.
31. Процесс отстаивания. Скорость осаждения взвешенных частиц. Расчет отстойников.
32. Отстойники: отстойники с наклонными перегородками, отстойники непрерывного действия с гребковой мешалкой, многоярусные отстойники, отстойники непрерывного действия с коническими полками.
33. Процесс фильтрования. Уравнения процесса фильтрования.
34. Определение постоянных в уравнениях фильтрования.
35. Устройство фильтров: нутч-фильтры, фильтрпрессы, листовые, барабанные фильтры, дисковые вакуум-фильтры.
36. Центрифугирование. Центробежная сила и фактор разделения.
37. Процессы в отстойных и фильтрующих центрифугах.
38. Устройство центрифуг: трех колонные, подвесные, горизонтальные с ножевым устройством для удаления осадка, с пульсирующим поршнем.
39. Жидкостные сепараторы. Трубочатые сверхцентрифуги. Гидроциклоны.
40. Разделение газовых систем. Очистка газов. Гравитационная очистка газов.
41. Очистка газов под действием инерционных и центробежных сил.
42. Очистка газов фильтрованием.
43. Мокрая очистка газов.
44. Электрическая очистка газов.
45. Мембранная технология для разделения жидких и газообразных систем.
46. Перемешивание в жидкой среде. Перемешивание при помощи мешалок. Мощность, потребляемая мешалками.
47. Критериальные уравнения расхода мощности. Эффективность перемешивания.
48. Конструкции мешалок: лопастные, пропеллерные, турбинные, якорные.
49. Перемешивание сжатым воздухом и паром (барботирование).

Контрольные задачи

Задача 1. При движении жидкости по трубопроводу возникают силы трения. Для определения коэффициента динамической вязкости данной жидкости используется вискозиметр Энглера.

Таблица 1

Определить силу трения T			
№	Обозначения	Ед-цы	Варианты

	параметров	измер-я	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	τ - время истечения	сек	90	85	80	70	65	60	83	78	75	70
2	t – температура воды	°C	30	40	50	60	70	80	45	55	65	75
3	F - поверхность	м ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	$\frac{dU}{dn}$ - градиент скорости	м/с	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Методические указания.

1. Необходимо определить $^{\circ}E$ – градус Энглера:

$$^{\circ}E = \frac{\tau}{\tau_{\text{эсп}}},$$

где τ - время истечения испытуемой жидкости, с;

$\tau_{\text{эсп}}$ – время истечения эталонной жидкости (H₂O), которое равно 51±1 сек.

2. Определение коэффициента кинематической вязкости по формуле Убелодэ:

$$\nu = \left(0,0731^{\circ}E - \frac{0,0631}{^{\circ}E}\right) \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Задача 2. Для перекачивания жидкости используется энергия сжатого воздуха и вакуум.

Таблица 2

Определить абсолютное давление – P _{абс} при избыточном давлении и вакууме												
№	Параметры	Ед. измер	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	h _{б-барботера}	мм рт.ст.	700	710	720	715	705	725	730	708	712	714
2	h _{из-избыточное}	мм в.ст.	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
3	h _{вак-вакуумное}	мм в.ст.	80	90	100	110	120	125	130	135	140	145
4	t - температура	°C	20	30	40	50	60	70	75	80	85	90

Методические указания.

1. Атмосферное давление воздуха определяется:

$$P_{\text{атм}} = \gamma \cdot h_{\text{Hg}} = \rho_{\text{Hg}} \cdot g \cdot h_{\text{Hg}}$$

2. Избыточное давление определяется: $P_{\text{изб}} = \gamma \cdot h_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g \cdot h_{\text{H}_2\text{O}}$

3. Вакуум определяется:

$$P_{\text{вак}} = \gamma \cdot h_{\text{H}_2\text{O}} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot g \cdot h_{\text{H}_2\text{O}}$$

Задача 3. По водопроводу от насосной станции должна подаваться вода в напорный бак:

количество подаваемой воды Q, м³/с;

длина водопровода l, м;

температура воды t, °C;

высота подъема h , м;

диаметр трубы d , м.

На водопроводе установлены один вентиль и три поворота под углом 90° с радиусом закругления $R=2d$, а $d=20$ мм.

Определить необходимый напор в начале водопровода.

Таблица 3

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$Q, \text{ м}^3/\text{с}$	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
$l, \text{ м}$	40	50	60	70	80	90	100	120	130	140
$t, ^\circ\text{C}$	5	5	5	15	15	15	15	10	10	10
$h, \text{ м}$	20	20	23	23	25	25	25	25	10	15

Методические указания.

1. Сопротивление движения жидкости по трубопроводу определяется:

$$h_{\text{пот}} = (1 + \Sigma \zeta + \lambda \frac{l}{d}) \frac{U^2}{2g}$$

2. Коэффициент Дарси по длине трубопровода определяется:

$\lambda = 0,11 \cdot (\frac{n}{d_3} + \frac{68}{\text{Re}})^{0,25}$, где n – коэффициент шероховатости (для нормальных водопроводных труб $n=0,012$).

Задача 4. Определить давление, развиваемое вентилятором, который подает азот ($\rho=1,2$ кг/м³) из газохранилища в реактор:

избыточное давление в газохранилище $h_{\text{изб}}$, м. вод. ст. ;

давление в аппарате $h_{\text{ап}}$, м. вод. ст. ;

потери во всасывающей линии $h_{\text{вс}}$, м. вод. ст. ;

потери в нагнетательной линии $h_{\text{н}}$, м. вод. ст. ;

скорость газа в нагнетательном трубопроводе U , м/с.

Таблица 4

№	Величины	Варианты									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$h_{\text{изб}} \cdot 10^3$	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
2	$h_{\text{ап}} \cdot 10^3$	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
3	$h_{\text{вс}} \cdot 10^3$	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
4	$h_{\text{н}} \cdot 10^3$	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
5	U	11	12	13	12	13	15	12	14	15	16

Методические указания.

1. Давление, развиваемое вентилятором, находим по формуле:

$$\Delta P = (P_{\text{ан}} - P_{\text{изб}}) + (\Delta P_{\text{вс}} + \Delta P_{\text{н}}) + \frac{\rho \cdot U^2}{2}.$$

Задача 5. В реакторе необходимо обеспечить равномерное распределение твердых частиц катализатора:

диаметр реактора D , м;

высота заполнения реактора реакционной массой H , м;

коэффициент динамической вязкости реакционной массы μ , Па·с;

плотность среды ρ_c , кг/м³;
 диаметр частиц катализатора d_2 , м;
 плотность катализатора ρ_2 , кг/м³;
 соотношение т:ж 1:4.

Определить мощность, затрачиваемую непосредственно на перемешивание.

Таблица 5

Параметры	Размерность	Варианты									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D	м	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
H	м	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4
$\mu \cdot 10^3$	Па·с	15	15	20	25	30	15	16	17	18	19
ρ_c	кг/м ³	12	12	13	13	14	14	12	12	13	13
$d_2 \cdot 10^3$	м	1,3	1,3	1,4	1,4	1,5	1,5	1,3	1,3	1,4	1,4
ρ_2	кг/м ³	24	24	25	25	26	26	24	24	25	25

Таблица 6

Тип мешалки	C	к	e	m	n
Пропеллерная	0,105	0,6	0,8	0,4	19
турбинная	0,25	0,57	0,37	0,33	11

Методические указания.

1. Определение диаметра нормализованной мешалки: $d_m = (0,25 \div 0,3)D$.

2. Нахождение критерия $Re_{ц}$: $Re_{ц} = C \cdot Ga^k \cdot Sp^l \cdot \Gamma_{d_2}^m \cdot \Gamma_D^n$,

где Ga – критерий Галилея;

Γ_{d_2} , Γ_D - геометрические симплексы.

3. Определение мощности, затрачиваемой на перемешивание:

$$N = K_N \cdot n^3 \cdot \rho_c \cdot d_m^5,$$

где K_N – коэффициент мощности (для пропеллерной мешалки $K_N=0,32$, для турбинной мешалки $K_N=1,3$).

Контрольное задание 2

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
номера	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6
вопросов	11	12	12	14	15	16	17	18	19	20
	27	28	29	30	21	22	23	24	25	26
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60

Контрольные вопросы

1. Теплообмен. Движущая сила теплообменных процессов.
2. Механизм теплообменных процессов.
3. Основные уравнения теплоотдачи, теплопроводности и теплопередачи.
4. Определение теплообменной поверхности теплообменника.
5. Определение средней движущей силы теплообмена.
6. Количество тепла, необходимое при нагревании раствора.

7. Коэффициенты теплоотдачи, теплопроводности и теплопередачи, размерности и их физические смыслы.
8. Зависит ли средняя разность температур от схемы движения теплоносителей (прямоток, противоток)?
9. Перечислите основные теплоносители, применяемые для нагрева, основные характеристики и их преимущества?
10. Интенсификация теплообмена. К какой величине стремится коэффициент теплопередачи из коэффициентов теплоотдачи. Что необходимо предпринять для увеличения коэффициента теплоотдачи?
11. Для чего и в каких случаях применяются ребристые поверхности нагрева?
12. Охлаждающие агенты, способы охлаждения и конденсации.
13. Трубчатые теплообменники.
14. Змеевиковые, пластинчатые и спиральные теплообменники (холодильники).
15. Для чего служат конденсатоотводчики, их конструкции?
16. Процесс выпаривания. Механизм процесса выпаривания.
17. Расчет выпарной установки. Определение теплообменной поверхности выпарной установки.
18. Температурные потери и температура кипения растворов.
19. Общая полезная разность температур и ее распределение по корпусам.
20. Устройство выпарных аппаратов.
21. Расчет многокорпусных выпарных аппаратов.
22. Основы массопередачи.
23. Равновесие при массопередаче. Материальный баланс. Рабочая линия.
24. Скорость массопередачи. Молекулярная диффузия. Турбулентная диффузия.
25. Дифференциальное уравнение массообмена в движущейся среде. Механизм процессов массопереноса.
26. Уравнение массоотдачи. Уравнение массопередачи. Зависимость между коэффициентами массопередачи и массоотдачи.
27. Движущая сила процессов массопередачи.
28. Расчет основных размеров массообменных аппаратов.
29. Аналитический метод определения числа ступеней. Графический метод определения числа ступеней.
30. Процесс абсорбции. Равновесие при абсорбции.
31. Материальный и тепловой балансы процесса абсорбции.
32. Устройство абсорбционных аппаратов.
33. Расчет пленочных, насадочных и тарельчатых абсорберов.
34. Перегонка жидкостей. Характеристики двухфазных систем жидкость – пар.
35. Простая перегонка.
36. Ректификация. Принцип ректификации.
37. Материальный баланс ректификационной колонны.
38. Расчет ректификационных колонн.
39. Устройство ректификационных аппаратов.
40. Процесс экстракции. Процессы экстракции в системах жидкость – жидкость.
41. Устройство экстракционных аппаратов.
42. Процессы растворения и экстракции в системах твердое тело – жидкость.
43. Расчет экстракционных аппаратов.
44. Процесс адсорбции. Характеристики адсорбентов и их виды.
45. Скорость адсорбции.
46. Устройство адсорберов и схемы адсорбционных установок.
47. Процесс сушки. Основные параметры влажного воздуха.
48. I-x диаграмма влажного воздуха (диаграмма Рамзина).
49. Равновесие при сушке. Формы связи влаги с материалом.

50. Материальный и тепловой балансы сушки.
51. Определение расходов воздуха и тепла при конвективной сушке.
52. Варианты процесса сушки.
53. Скорости сушки. Кинетика сушки. Изменение температуры материала в процессе сушки.
54. Конвективные сушилки с неподвижным или движущимся плотным слоем материала.
55. Конвективные сушилки с перемешиванием слоя материала.
56. Конвективные сушилки со взвешенным слоем материала.
57. Контактные сушилки.
58. Распылительные сушилки. Высокочастотные (диэлектрические) сушилки. Сублимационные сушилки.
59. Сушка инфракрасными лучами (терморadiационные сушилки).

Контрольные задачи

Задача 1. Для нагревания воздуха требуется подобрать пластинчатый калорифер при следующих условиях:

- количество нагреваемого воздуха G , кг/с;
- начальная температура воздуха t_1 , $^{\circ}\text{C}$;
- конечная температура воздуха t_2 , $^{\circ}\text{C}$;
- средняя скорость воздуха в живом сечении U , м/с;
- давление греющего пара P , Мпа.

Таблица 1

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G	1500	1600	1700	2000	2500	2600	2700	2800	2900	3000
t_1	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
t_2	60	65	70	65	70	75	80	75	70	65
U	10	10	10	10	9	9	9	10	10	10
P	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,45	0,4	0,35

Методические указания.

1. Перед расчетом надо начертить схему калорифера.
2. Поверхность нагрева определяется по общей формуле теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t_{cp}},$$

где $k = 0,01 \cdot (\gamma \cdot U)^{0,56} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}}$

3. Живое сечение определяется по средней скорости и объемному расходу:

$$f_{ж} = \frac{V}{3000 \cdot U}, \text{ м}^2,$$

где V – расход, $\text{м}^3/\text{ч}$.

4. По живому сечению и по поверхности нагрева подбирается модель калорифера (по нормам).
5. Если одной модели будет недостаточно, нужно комбинировать, включая их последовательно или параллельно, в зависимости от величины живого сечения.

Задача 2. Рассчитать кожухотрубный нагреватель воды по следующим данным:

- количество нагреваемой воды – G , кг/с;
- начальная температура воды – t_n , $^{\circ}\text{C}$;

конечная температура воды – t_k , °С;
 давление греющего пара – P , Па;
 коэффициент теплопередачи – K , Вт/м²·°К;
 потери тепла в окружающую среду – $Q_{пот}$, Вт;
 длина одной трубки аппарата – l , м;
 диаметр трубки (наружный) – d , м;
 движение пара и воды – противоток.

Требуется:

рассчитать поверхность нагрева аппарата – F , м²;
 определить количество нагревательных трубок в аппарате – n , шт;
 определить расход греющего пара – D , кг/с;
 начертить схему аппарата с указанием подачи пара и воды.

Таблица 2

Величины	Ед-цы изм.	Варианты по последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
G	кг/с	1,4	2,22	1,66	1,1	1,9	2,5	2,7	2,22	1,4	2,5
t_n	°С	22	25	20	21	23	24	22	20	25	25
t_k	°С	70	80	75	75	80	70	80	70	90	85
$P \cdot 10^{-5}$	Па	2,0	5,0	4,0	3,0	6,0	5,0	6,0	4,0	3,0	5,0
K	Вт/м ² ·°К	800	750	900	700	850	900	1000	850	700	900

Таблица 3

Величины	Единицы измерения	Варианты по последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q_{пот}$	%	2	4	3	2	4	5	5	5	2	4
l	м	2,0	3,0	2,5	2,0	2,5	3,5	3,5	3,0	2,0	3,0
$d \cdot 10^{-3}$	м	25	38	25	20	38	54	54	38	25	54

Методические указания к решению задачи 2

Перед решением задачи необходимо изучить разделы учебника по основам теплообмена в пищевой аппаратуре, конструкциям теплообменных аппаратов и их расчетам [2,3].
 Для расчета поверхности нагрева аппарата можно воспользоваться уравнением теплопередачи: $Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}$.

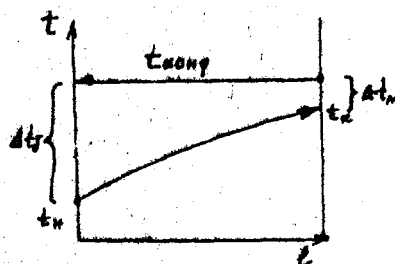
Тепло, полученное водой от пара, равно

$$Q = G \cdot c \cdot (t_k - t_n),$$

здесь G – количество нагреваемой воды - надо взять в кг/с, а удельную теплоемкость «с» необходимо выбрать по таблице физических свойств воды (см. приложение) в зависимости от средней температуры воды в нагревателе.

Температурный напор определяется:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\sigma} + \Delta t_{\mu}) / 2, \text{ при } \Delta t_{\sigma} / \Delta t_{\mu} < 2$$



$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}) / \ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}, \text{ при } \Delta t_{\delta} / \Delta t_{\text{м}} \geq 2$$

Температура пара берется по таблице насыщенного пара в зависимости от его давления Р (см. приложение 1).

Полный расход тепла на нагревание воды определяется:

$$Q_{\text{полн}} = Q + Q_{\text{пот}} = (1,02 + 1,05) \cdot Q.$$

Поверхность нагрева определяется по формуле:

$$F = Q_{\text{полн}} / K \cdot \Delta t_{cp}.$$

Количество трубок в нагревателе определяется:

$$n = F / f_{\text{тр}},$$

где $f_{\text{тр}}$ – поверхность одной трубки, равная

$$f_{\text{тр}} = \pi \cdot d \cdot l.$$

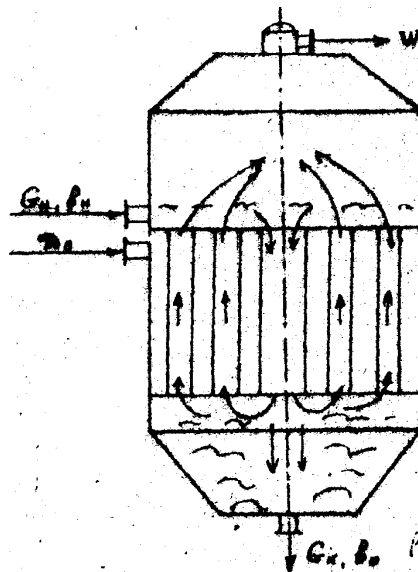
Расход греющего пара определяется по формуле:

$$D = Q_{\text{пара}} / r_{\text{Д}},$$

где $Q_{\text{пара}} = Q_{\text{полн}}$;

$r_{\text{Д}}$ – удельная теплота парообразования (конденсации) греющего пара, кДж/кг (приложение 2).

Задача 3.



Рассчитать однокорпусной выпарной аппарат по следующим данным:
 количество свежего раствора, поступающего на выпаривание - $G_{\text{н}}$, кг/с;
 начальная концентрация сухих веществ свежего раствора - $В_{\text{н}}$, %;
 конечная концентрация сухих веществ упаренного р-ра - $В_{\text{к}}$, %;
 температура свежего раствора - $t_{\text{н}}$, °С;
 температура кипения раствора - $t_{\text{к}}$, °С;
 давление в аппарате - $P_{\text{вт}}$, Па;
 теплоемкость свежего раствора - $C_{\text{р}}$;
 давление греющего пара - $P_{\text{п}}$, Па;
 коэффициент теплопередачи - K , Вт/(м²°К);
 тепловые потери - $Q_{\text{пот}}$, %;

Требуется определить:

количество выпариваемой воды - W , кг/с;

расход греющего пара - D , кг/с;
 полезную разность температур - $\Delta t_{пол}$, °С;
 поверхность нагрева аппарата - F , м.

Таблицы исходных данных

Таблица 4

Величины	Ед. изм.	Вариант по последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
G_n	кг/с	2,7	2,2	2,6	1,6	2,0	2,36	1,38	1,8	1,94	2,5
v_n	%	7,0	6,0	7,0	5,0	5,0	7,0	5,0	6,0	6,0	7,0
v_k	%	30	32	32	30	28	30	28	32	30	30
t_n	°С	16	17	18	19	20	15	16	14	16	18
$P_{вт} \cdot 10^{-5}$	Па	0,3	0,4	0,6	0,45	0,3	0,5	0,4	0,25	0,6	0,5
C_p	кДж/кг°С	4,06	4,1	4,06	4,15	4,15	4,06	4,15	4,1	4,1	4,06
$P_{г.п} \cdot 10^{-5}$	Па	2,0	2,2	3,5	4,3	5,0	3,4	4,2	3,9	4,5	3,4

Таблица 5

Величины	Ед. изм.	Вариант по последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
K	Вт/ м ^{2о} К	1120	1270	1200	970	1150	1200	1050	1080	1000	1100
Δ	°С	3	4	5	6	3,5	4,5	5	4,5	3,8	5,5

Методические указания к решению задачи 3

Перед решением задачи необходимо изучить теорию выпаривания, работу выпарных аппаратов и методы расчета выпарных установок (1,2,3).

Производительность аппарата по выпаренной влаге (кг/с) из раствора определится из уравнения:

$$W = G_n \cdot \left(1 - \frac{b_n}{b_k}\right).$$

Расход греющего пара (кг/с) определяется из уравнения теплового баланса:

$$D = \frac{Q}{i' - i''} = \frac{(1,02 \div 1,05) \cdot [G_n \cdot C_p \cdot (t_{кин} - t_n) + W \cdot (i_w - C_B \cdot t_{кин})]}{i' - i''},$$

где $1,02 \div 1,05$ – коэффициент, учитывающий потери тепла;

i' – энтальпия греющего пара, кДж/кг;

i'' – энтальпия конденсатора, кДж/кг;

i_w – энтальпия вторичного пара, к Дж/кг;

C_p – теплоемкость воды при температуре кипения раствора, кДж/кг°К.

Величины i', i'', i берутся из таблицы насыщенного водяного пара при соответствующем давлении, а C_p берется по таблице физических свойств воды (см. приложение 1 и 2).

Полезная разность температур определяется из уравнения:

$$\Delta t_{пол} = t_n - t_{кин.р-ра} - \Delta,$$

где t_n – температура греющего пара (берется из таблицы насыщенного пара при соответствующем давлении).

Поверхность нагрева (м) аппарата определяется из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{пол}},$$

$$\text{где } Q = (1,02 \div 1,05)[G_n \cdot C \cdot (t_{кин} - t_n) + W \cdot r_w] = D \cdot r_D.$$

Отсюда $D = \frac{Q}{r_D}$ - количество греющего пара, кг/с,

где r_D – удельная теплота конденсации греющего пара, кДж/кг;

$r_D = f(P_n)$, (приложение 2);

r_w – удельная теплота конденсации вторичного пара, кДж/кг;

$r_w = f(P_{an})$, (приложение 2).

Задача 4

Рассчитать непрерывно действующую сушилку, работающую по нормальному сушильному процессу при следующих данных:

производительность сушилки по влажному материалу – G_n , кг/с;

начальная влажность материала – w_n , %;

конечная влажность материала – w_k , %;

теплоемкость высушенного материала – C_m , кДж/кг $^{\circ}$ С;

масса транспортного устройства – $G_{тр}$, кг;

теплоемкость транспортного устройства – $C_{тр}$, кДж/кг $^{\circ}$ С;

температура материала на входе в сушилку – θ_1 , $^{\circ}$ С;

относительная влажность воздуха на входе в калорифер – ϕ_0 , %;

температура материала на выходе из сушилки – θ_2 , $^{\circ}$ С;

температура воздуха на выходе из калорифера – t_1 , $^{\circ}$ С;

температура воздуха на выходе из сушилки – t_2 , $^{\circ}$ С;

температура транспортного устройства на входе в сушилку – $t_{н}^{тр}$, $^{\circ}$ С;

температура транспортного устройства на выходе из сушилки – $t_{к}^{тр}$, $^{\circ}$ С;

тепловые потери в окружающую среду от суммы всех остальных слагаемых теплового баланса – $q_{пот}$, %;

температура наружного воздуха – t_0 , $^{\circ}$ С.

Воздух в сушильной камере не подогревается.

Требуется:

определить расход воздуха – L , кг/ч;

расход тепла – Q , кДж/ч;

расход греющего пара – D , кг/ч.

Построить графики процессов в I-X диаграмме для теоретической и действительной сушилок.

Таблицы исходных данных

Таблица 6

Величины	Ед. изм.	Варианты по последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
G_n	кг/с	0,27	0,83	0,69	1,1	0,41	0,97	1,38	1,25	0,55	0,83
ω_n	% (мас.)	30	34	31	33	35	32	30	34	31	30
ω_k	% (мас.)	10	11	9	10	11	10	9	10	10	11
C_m	кДж/кг $^{\circ}$ С	2,14	2,25	2,18	2,22	2,37	2,20	2,14	2,25	2,18	2,14
$G_{тр}$	кг/с	0,19	0,2	0,18	0,15	0,17	0,16	0,19	0,2	0,17	0,16
$C_{тр}$	кДж/кг $^{\circ}$ С	1,57	1,6	1,55	1,65	1,62	1,68	1,59	1,5	1,54	1,6
$t_{н}^{тр}$	$^{\circ}$ С	20	18	22	19	21	23	20	21	20	19
$t_{к}^{тр}$	$^{\circ}$ С	60	55	57	58	50	60	56	50	60	55
$q_{пот}$	%	10	12	11	14	10	12	15	13	10	12
θ_1	$^{\circ}$ С	20	18	22	19	21	23	20	21	20	19
θ_2	$^{\circ}$ С	60	55	57	58	50	60	56	50	60	54

Таблица 7

Величины	Ед. изм.	Варианты по последней цифре шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
φ_0	%	68	60	65	69	57	65	70	58	55	60
t_1	°С	100	110	90	95	105	120	105	100	110	95
t_0	°С	20	22	18	20	19	21	20	18	22	21

Методические указания к решению задачи 4

Перед решением задачи необходимо изучить теоретический материал, касающийся процесса сушки (1,2,3).

Количество испаренной в сушилке влаги (кг/ч) определяется:

$$W = G_n \cdot \frac{\omega_n - \omega_k}{100 - \omega_k}.$$

По диаграмме I-X (см. приложение) находят теплосодержание I (кДж/кг) и влагосодержание X, 1 (кДж/кг) воздуха до и после сушки. При этом следует иметь в виду, что $t_2 = \theta_2$. Расход сухого воздуха на испарение 1 кг влаги при теоретической сушке:

$$l = \frac{1}{x_2 - x_1}, \text{ (кг сух. возд./кг исп. влаги).}$$

Расход тепла на 1 кг испаренной влаги для теоретической сушилки определяется по формуле:

$$q = l \cdot (I - I_0).$$

Производительность сушилки по высушенному материалу (кг/с):

$$G_k = G_n - W.$$

В действительной сушилке энергия расходуется на:

а) подогрев материала (кДж/кг W):

$$q_m = \frac{G_m \cdot C_m \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{W};$$

б) подогрев транспортного устройства (кДж/кг W): $q_{mp} = \frac{G_{mp} \cdot C_{mp} \cdot (t_k^{mp} - t_n^{mp})}{W}.$

Тепло, вносимое с влагой материала (кДж/кг W):

$$q_w = C_w \cdot \theta,$$

где $C_w = 4,19 \cdot 10^3$ – теплоемкость воды, Дж/кг·°С.

По заданному условию определяются тепловые потери (кДж/кг) в окружающую сре-

$$\text{ду: } q_n = (q + q_m + q_{mp} - q_w) \cdot \frac{q_{nom}}{100}.$$

Поправка на действительный сушильный процесс определяется по формуле:

$$\Delta = q_w - (q_m + q_{mp} + q_{nom}).$$

Зная величину Δ , из уравнения $\Delta = l \cdot (I - I_1)$ определяем теплосодержание воздуха при действительной сушке:

$$I = I_1 \pm \frac{\Delta}{l} \text{ или } I = I_1 \pm \Delta(x - x_0).$$

Для построения рабочей линии реальной сушки на диаграмме I-X необходимо знать (x и I) минимум двух точек. Координаты одной точки известны: x_1 и I_1 . Для нахождения координат второй точки зададимся произвольным значением x и определяем соответствующее значение I.

Через две точки на диаграмме I-x с координатами $x_1=x_0$, I_1 и x, I проводим линию сушки до пересечения с заданным конечным параметром t_2 . В точке пересечения линии сушки с изотермой t_2 находим параметры отработанного сушильного агента: x_2 и I_2 .

Общий расход воздуха на сушку (кг. сух. возд. /с) определяется по формуле:

$$L = l \cdot W .$$

Общий расход тепла на сушку (кДж/с, кВт) определяется по формуле:

$$Q = L \cdot (I_2 - I_0) .$$

Принимаем разность температур греющего пара и воздуха на выходе из калорифера $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Тогда температура греющего пара будет равна:

$$t_{\text{гр.пара}} = t_1 + \Delta t .$$

Расход греющего пара:

$$D = \frac{Q}{r_D} ,$$

где $r_D = f(P_n)$, (приложение 2).

Задача 5. Рассчитать насадочный абсорбер для поглощения паров SO_2 из воздуха водой по следующим данным:

- количество воздуха с $\text{SO}_2 - G$, кг/с;
- содержание паров $\text{SO}_2 - y_0$, % (мас.);
- температура воздуха с парами $\text{SO}_2 - t$, $^\circ\text{C}$;
- содержание SO_2 в воде на выходе - x_0 , % (мас.);
- степень извлечения паров SO_2 из воздуха - d_1 , %;
- кольца Рашига размером - $25 \times 25 \times 3$;
- удельная поверхность насадки - f_n , $\text{м}^2/\text{м}^3$;
- свободный объем насадки - V_c , $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Данные о равновесных концентрациях SO_2 в воде и газе при $10 \text{ }^\circ\text{C}$ следующие:

X кг SO_2 /кг воды	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Y кг SO_2 /кг газа	0,0625	0,134	0,292	0,481	0,695	0,966

Определить:

- диаметр абсорбера;
- общую высоту абсорбера;
- высоту насадок f_2 ;
- построить график равновесия и рабочей линии.

Таблица исходных данных

Таблица 8

№	Величины	Единицы измерений	Варианты по последней цифре шифра									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	G	кг/с	0,44	0,22	0,33	0,3	0,25	0,19	0,44	0,23	0,2	0,4
2	y_0	% (мас.)	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
3	x_0	% (мас.)	2,5	2,7	2,2	2,1	2,3	2,4	2,6	2,0	2,3	2,8
4	t	$^\circ\text{C}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
5	d	%	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90

Методическое указание к решению задачи 5

Перед решением задачи необходимо проработать теоретический материал по основам процесса, расчетам аппаратов, их конструкциям [1,2,3].

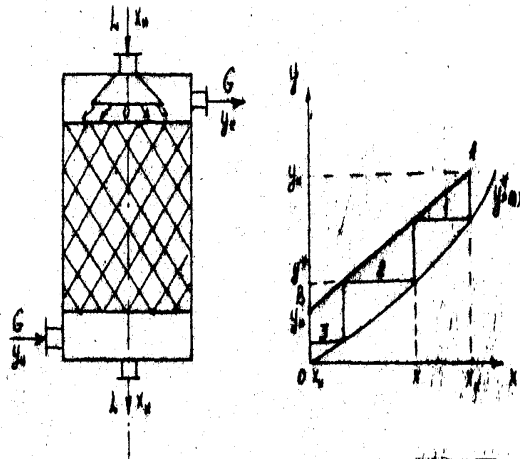


Рис.1. Аппарат для абсорбции Рис.2. Диаграмма абсорбции

Рассчитываем относительные массовые составы жидкости и газа на входе и выходе из него по следующим формулам:

$$y_0 = y / (1 - y);$$

$$x_0 = x / (1 - x);$$

жидкая фаза

на входе в аппарат $x_M = 0$,

на выходе из аппарата $x_K = x_0 / (1 - x_0) = [\text{кг SO}_2 / \text{кг воды}]$;

газовая фаза

на входе в аппарат $y_H = y_0 / (1 - y_0) = [\text{кг SO}_2 / \text{кг воздуха}]$,

на выходе из аппарата $y_K = (1 - d) \cdot y_0 = [\text{кг SO}_2 / \text{кг воздуха}]$,

Значения y_0 , x_0 , d подставлять в массовых долях.

Полученные данные являются координатами двух точек:

$A(x_H, y_H)$ и $B(x_K, y_K)$, через которые проходит рабочая линия процесса абсорбции (рис2).

Количество SO_2 , поглощаемое водой в абсорбере:

$$M = G(y_H - y_K).$$

Расход воды на поглощение SO_2 :

$$L = G(y_H - y_K) / (x_K - x_H).$$

Коэффициент молекулярной диффузии:

$$D_T = \frac{0,0435 \cdot T^{1,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P \cdot (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2}, \text{ (м}^2/\text{с)},$$

где T – температура среды, $^\circ\text{K}$;

P – общее давление, Па;

V_A и V_B мольные объемы газов (SO_2 и воздуха), $\text{см}^3/\text{моль}$, (44,8 и 29,9);

M_A и M_B – молекулярные массы SO_2 и воздуха.

Высота насадки, эквивалентная одной ступени концентрации,

$$h_3 = 108 W_{np}^{-0,25} \cdot d_3^{1,24} \cdot Pr_T^{0,5},$$

где $W_{np} = W \cdot \sqrt{\rho_T}$ – приведенная скорость газа в абсорбере, м/с;

W – рабочая скорость газа, м/с;

ρ_T – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$;

d_3 – эквивалентный диаметр насадки, м;

$$d_3 = \frac{4 \cdot V_c}{f_H}, \text{ для насадки кольца Рашига } 25 \times 25 \times 3$$

$$V_c = 0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$f_H = 204 \text{ м}^2/\text{м}^3.$$

Pr_Γ – диффузионный критерий Прандтля:

$$Pr_\Gamma = \frac{\mu_\Gamma}{(\rho_\Gamma \cdot D_\Gamma)},$$

где μ_Γ и ρ_Γ – соответственно динамическая вязкость (Па·с) и плотность (кг/м³) газа (воздуха).

Допустимая рабочая скорость газа (воздуха) в насадочной колонне:

$$\lg \left[\frac{w^2 \cdot f_H \cdot \rho_\Gamma \cdot \mu_{ж}^{0,16}}{g \cdot V_c^3 \cdot \rho_{ж}} \right] = A - 1,75 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_\Gamma}{\rho_{ж}} \right)^{0,125},$$

где f_H – удельная поверхность насадок, м²/м³, ($f_H = 204 \text{ м}^2/\text{м}^3$);

V_c – свободный объем насадки, м³/м³, ($V_c = 0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$);

$\mu_{ж}$ – вязкость воды, Мпа·с;

A – опытный коэффициент (для газожидкостных – 0,22)

(для парожидкостных – 0,125);

L и G – расход жидкости и газа, кг/с.

Высота абсорбционной колонны:

$$H = n \cdot h_s + 2h_3 + h_3.$$

Теоретическое число ступеней (n_T) абсорбционной колонны определяется графическим методом из диаграммы у-х (рис. 2).

Действительное число ступеней (n): $n = (1,3 \div 1,5)n_T$.

Диаметр абсорбционной колонны:

$$D = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot w \cdot \rho}}.$$

Поверхность массообмена (F) определяется из общего уравнения массопередачи:

$$F = \frac{M}{K_m \cdot \Delta y_{cp}},$$

где K_m – коэффициент массопередачи ($K_m = 11,6/3600 \text{ кг}/\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$);

Δy_{cp} – движущая сила процесса абсорбции.

$$\Delta y_{cp} = \frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{\ln \frac{\Delta y_1}{\Delta y_2}},$$

$$\Delta y_1 = y_n - y^* ;$$

$$\Delta y_2 = y_k - y^* .$$

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Физические свойства воды
(на линии насыщения)

t, °С	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/кг·°К	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·°К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /сек	$\beta \cdot 10^4$, К ⁻¹	$\sigma \cdot 10^4$, кг/с ²	Pr
0	1000	4,23	65,1	1,79	-0,63	756	13,7
10	1000	4,19	57,5	1,31	+0,70	762	9,52
20	998	4,19	59,9	1,01	1,182	727	7,02
30	996	4,18	61,8	0,81	3,21	712	5,42
40	992	4,18	63,4	0,66	3,87	697	4,31
50	988	4,18	64,8	0,556	4,49	677	3,54
60	983	4,18	65,9	0,478	5,11	662	2,98
70	978	4,19	66,8	0,415	5,70	643	2,55
80	972	4,19	67,5	0,365	6,32	626	2,21
90	965	4,19	68,0	0,326	6,95	607	1,95
100	958	4,23	68,3	0,295	7,5	589	1,75
110	951	4,23	68,5	0,268	8,0	569	1,58
120	943	4,23	68,6	0,244	8,6	549	1,43
130	935	4,27	68,6	0,226	9,2	529	1,32
140	926	4,27	68,5	0,212	9,7	507	1,23
150	917	4,32	68,4	0,202	10,3	487	1,17
160	907	4,36	68,3	0,191	10,8	466	1,10
170	897	4,40	67,9	0,181	11,5	444	1,05
180	887	4,44	67,5	0,173	12,2	424	1,01

Приложение 2

Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления.

Пересчет в СИ: 1 ат. = $9,81 \cdot 10^4$ Па

Давление (абс.), ат., Р	Температура, °С, t	Плотность, кг/м ³ , ρ	Энтальпия жидкости, кДж/кг, (i')	Энтальпия пара, кДж/кг, (i'')	Теплота парообразования, кДж/кг, (r)
0,2	59,7	0,1283	250,1	2607	2358
0,3	68,7	0,1876	287,9	2620	2336
0,4	75,4	0,2456	315,9	2632	2320
0,5	80,9	0,3027	339,0	2642	2307
0,6	85,5	0,3590	358,2	2650	2296
0,7	89,3	0,4147	375,0	2657	2286
0,8	93,0	0,4699	389,7	2663	2278
0,9	96,2	0,5246	403,1	2668	2270
1,0	99,1	0,5790	415,2	2677	2264
1,2	104,2	0,6865	437,0	2686	2249
1,4	108,7	0,7931	456,3	2693	2237
1,6	112,7	0,898	473,1	2703	2227
1,8	116,8	1,003	483,6	2709	2217
2,0	119,6	1,107	502,4	2710	2208
3,0	132,9	1,618	558,9	2730	2171

4,0	142,9	2,120	601,1	2744	2141
5,0	151,1	2,614	637,7	2754	2117
6,0	158,1	3,104	667,9	2768	2095

Приложение 3

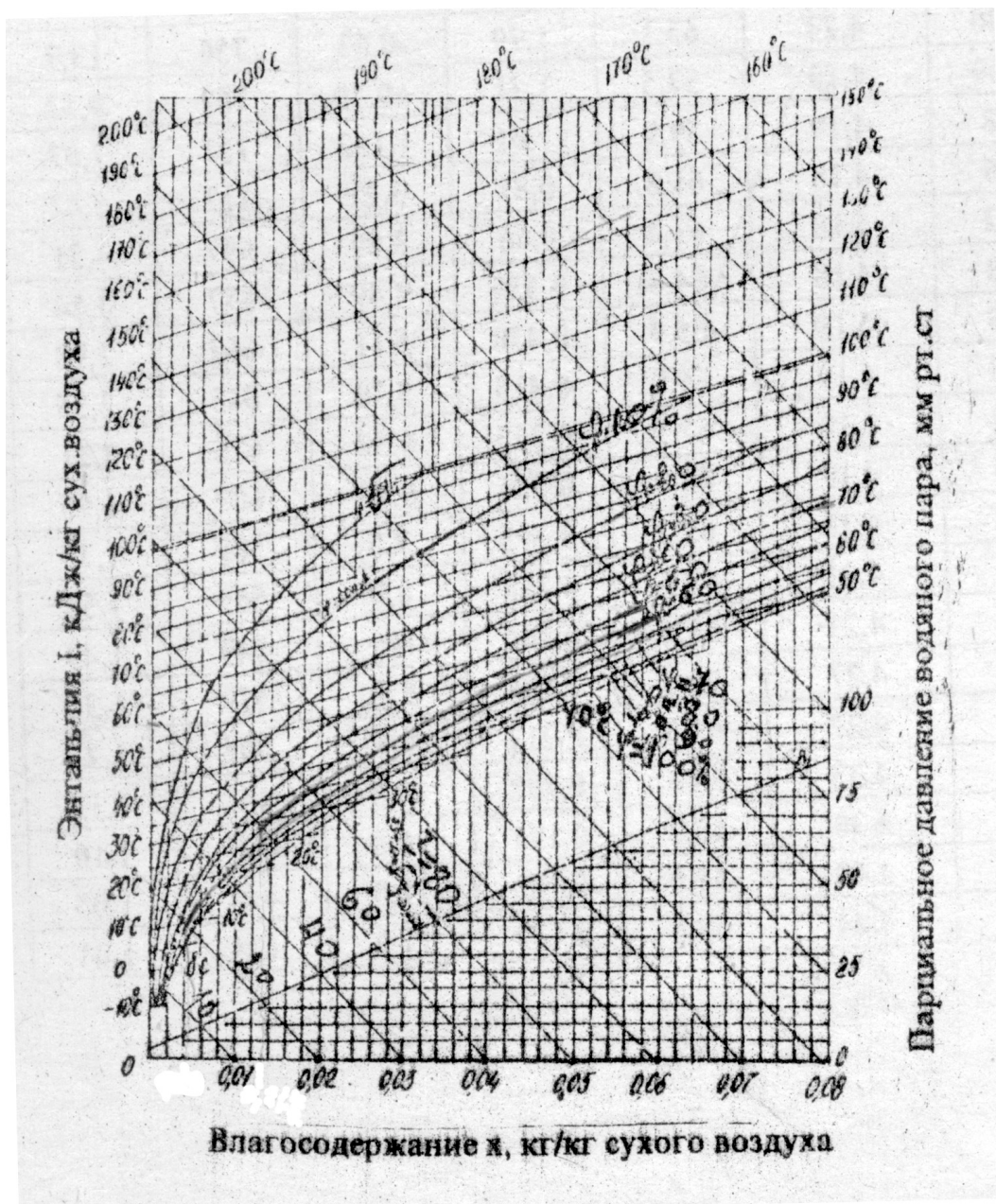
Основные физические свойства молока

t, °C	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°К)	C, Дж/(кг·°К)	μ , Па·с	Pr	σ , Н/м
1	2	3	4	5	6	7
5	1032,6	0,486	3868	3,02	30,2	47
10	1031,7	0,489	3870	2,52	20,0	45
15	1030,7	0,492	3880	2,14	16,9	45
20	1028,7	0,495	3890	1,82	14,3	43
30	1024,8	0,500	3900	1,35	10,6	42
40	1020,9	0,506	3910	1,10	8,5	42
50	1015,9	0,516	3870	0,87	6,5	42
60	1011,1	0,518	3850	0,72	5,35	42
70	1005,2	0,524	3850	0,63	4,65	42
80	1000,3	0,530	3850	0,58	4,2	42
90	999	0,531	3850	0,56	4,07	42
100	887	0,542	3850	0,54	3,84	42

Приложение 4

Основные физические свойства рассола
(концентрация = 22,5%, температура замерзания 253 °К)

t, °C	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°К)	C, Дж/(кг·°К)	μ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$, м ² /сек	Pr
1	2	3	4	5	6	7
5	1170	0,56	3330	2,46	2,10	14,7
0	1181	0,54	3330	2,98	2,52	18,4
-5	1183	0,523	3329	3,66	3,08	23,4
-10	1185	0,505	3328	4,57	3,86	30,1
-15	1187	0,49	3322	5,61	4,73	38,2
-20	1188	0,476	3320	6,85	5,77	47,5



Приложение 5

Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении

t , $^{\circ}\text{C}$	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	C_p , $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{К})$	λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{К})$	$\nu\cdot 10^6$, $\text{м}^2/\text{сек}$	Pr
1	2	3	4	6	7
-50	1,584	1035	2,03	9,23	0,728
-20	1,395	1035	2,26	12,79	0,716
0	1,293	1010	2,37	13,28	0,707
10	1,247	1010	2,44	14,16	0,705
20	1,205	1010	2,52	15,06	0,703
30	1,165	1010	2,57	16,00	0,701
40	1,128	1010	2,66	16,96	0,699
50	1,093	1010	2,72	17,95	0,698

60	1,060	1010	2,80	18,97	0,696
70	1,029	1010	2,86	20,02	0,694
80	1,000	1010	2,93	21,09	0,692
90	0,972	1010	3,0	22,10	0,690
100	0,946	1010	3,05	23,13	0,688
120	0,898	1010	3,2	25,45	0,686
140	0,854	1015	3,32	27,80	0,684
160	0,815	1025	3,44	30,09	0,682
180	0,779	1040	3,56	32,49	0,681

Список используемой литературы

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Изд. 9-е М.; Химия, 1973, 750 с.
2. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.; Химия, 1976, 552 с.
3. Дытнерский Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Курсовое и дипломное проектирование. М., 1991, 471 с.
4. Федосеев К. Г. Процессы и аппараты биотехнологии в химико – фармацевтической промышленности. М., Медицина, 1969, 199 с.