

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»**  
**Северский технологический институт – филиал НИЯУ МИФИ**  
**(СТИ НИЯУ МИФИ)**

Л.Ф. Зарипова

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ**

Учебное пособие

Северск 2013

УДК 66.02  
ББК 35.11  
З-347

**Зарипова Л.Ф.**

З-347 Процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие/Л.Ф. Зарипова.– 2-е изд., перераб. и доп. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2013.– 57 с.

Разработано для студентов специальности 240801 «Машины и аппараты химических производств» дневной и заочной форм обучения и включает в себя рабочую программу и контрольные задания по курсу «Процессы и аппараты химической технологии».

Пособие одобрено на заседании кафедры МАХАП (протокол № 7 от «03» июля 2013 г.).

Печатается в соответствии с планом выпуска учебно-методической литературы на 2013 г., утвержденным Советом СТИ НИЯУ МИФИ.

Рег. № 30/13 от 30.10.2013 г.

Рецензенты  
д-р техн. наук, профессор СТИ НИЯУ МИФИ  
В.Л. Софронов  
ведущий инженер-конструктор ОГК СХК  
А.Н. Володин

## Содержание

Введение.....	5
1 Общие методические указания.....	6
2 Рабочая программа по курсу «Процессы и аппараты химической технологии».....	8
3 Контрольная работа 1 (Расчет кожухотрубчатого теплообменника) .....	10
3.1 Задание на расчет теплообменника.....	10
3.2 Методика расчета теплообменника.....	10
3.2.1 Выбор конструктивных элементов и скорости жидкости.....	10
3.2.2 Расчет среднего температурного напора.....	11
3.2.3 Определение коэффициента теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_1$ .....	12
3.2.4 Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости $\alpha_2$ .....	12
3.2.5 Определение коэффициента теплопередачи.....	14
3.2.6 Расчет поверхности теплообмена и основных размеров теплообменника.....	14
3.2.7 Расчет изоляции и тепловых потерь в окружающую среду.....	15
3.2.8 Определение расхода греющего пара.....	15
4 Контрольная работа 2 (Расчет выпарного аппарата) .....	19
4.1 Задание на расчет выпарного аппарата.....	19
4.2 Методика расчета выпарного аппарата.....	19
4.2.1 Определение количества выпаренной воды.....	19
4.2.2 Определение температур греющего, вторичного пара и температурных потерь.....	19
4.2.3 Расчет температуры кипения раствора и полезной разности температур .....	20
4.2.4 Расчет коэффициентов теплоотдачи.....	21
4.2.5 Расчет коэффициента теплопередачи.....	22
4.2.6 Определение площади поверхности нагрева и расхода греющего пара.....	23
4.2.7 Расчет толщины тепловой изоляции.....	24
5 Контрольная работа 3 (Расчет ректификационной колонны).....	27
5.1 Задание на расчет колонны.....	27
5.2 Методика расчета колонны.....	27
5.2.1 Определение числа тарелок графическим методом....	27
5.2.2 Расчет количества дистиллята и кубового остатка.....	29
5.2.3 Определение расхода греющего пара.....	30
5.2.4 Определение расхода воды в дефлегматоре и конденсаторе.....	31
5.2.5 Расчет диаметра и высоты колонны.....	32

6	Контрольная работа 4 (Расчет барабанной конвективной сушилки).....	38
6.1	Задание на расчет сушилки.....	38
6.2	Методика расчета сушилки.....	38
6.2.1	Определение влаги, удаляемой в процессе сушки.....	38
6.2.2	Нахождение параметров воздуха.....	39
6.2.3	Определение тепловых потерь.....	41
6.2.4	Построение действительного процесса на <i>I-x</i> диаграмме.....	42
6.2.5	Определение расходов воздуха и тепла.....	43
6.2.6	Определение основных размеров барабана.....	43
6.2.7	Определение продолжительности сушки.....	44
6.2.8	Определение числа оборотов барабана.....	44
7	Рекомендуемая литература.....	48
7.1	Основная.....	48
7.2	Дополнительная.....	48
	Приложение А (справочное). Физические свойства водных растворов.....	50
	Приложение Б (справочное). Свойства насыщенного водяного пара..	54
	Приложение В (справочное). Физические свойства воды .....	55
	Приложение Г (справочное). Коэффициенты теплопроводности материалов.....	56

## **Введение**

Процессы и аппараты химической технологии - инженерная наука, изучающая закономерности протекания и методы расчета типовых процессов, а также их аппаратное оформление. Важным элементом является выявление общности различных процессов и аппаратов и обобщение методов их расчета. Изучение курса «Процессы и аппараты химической технологии» позволяет подготовить инженера-конструктора химических машин и аппаратов и механика химических предприятий, владеющих навыками проектирования и эксплуатации наиболее рациональных типов аппаратов, используемых в высокоэффективных и малоотходных технологических схемах с использованием современных вычислительных средств.

## 1 Общие методические указания

Целью курса «Процессы и аппараты химической технологии» является изучение теоретических основ технологических процессов химической промышленности, устройства и принципа работы аппаратов и методов их расчетов.

Курс целесообразно изучать последовательно по темам (разделам). Сначала следует изучить теоретическую часть раздела. Учебный материал можно считать проработанным и усвоенным только при условии, если студент умеет правильно применить теорию для решения практических задач.

Существенное значение имеет правильный выбор учебника. Не следует одновременно пользоваться несколькими учебниками. Один из учебников, рекомендуемый в списке учебной литературы, должен быть принят в качестве основного. Другие учебники и учебные пособия используют в том случае, если прорабатываемый раздел отсутствует или недостаточно подробно изложен в основном учебнике.

В процессе изучения дисциплины студенты должны:

**- знать:**

- 1) основные закономерности процессов;
- 2) физико-химическую сущность основных процессов, закономерностей их протекания;
- 3) основные методы расчетов процессов и аппаратов;
- 4) типовые конструкции аппаратов, основные принципы их конструирования;
- 5) пути интенсификации процессов и повышения их экономичности.

**- уметь:**

- 1) выбирать оптимальные условия проведения технологических процессов;
- 2) выполнять материальные и энергетические расчеты технологических процессов;
- 3) выбирать рациональную конструкцию аппарата, рассчитывать аппарат, заданную производительность;
- 4) выбирать основное и вспомогательное оборудование по каталогам и справочникам;
- 5) анализировать условия и режим работы оборудования.

В соответствии с учебными планами и рабочими программами студенты выполняют в 7 и 8 семестрах по две контрольные работы.

Перед выполнением контрольных работ студенты должны изучить теорию соответствующего процесса по рекомендуемой литературе, изобразить эскиз аппарата с его кратким описанием.

Необходимо изучить разделы, соответствующие контрольным работам:

- основы теплообмена в химической аппаратуре; аппаратура для нагревания, охлаждения и выпаривания;
- перегонка и ректификация; ректификационная колонна непрерывного действия, принцип работы;
- сушка; уравнения материального и теплового баланса конвективной сушки;  $I$ - $x$  диаграмма Рамзина.

Студенты, выполнившие и защитившие контрольные работы, допускаются к экзамену. В 9 семестре студенты получают индивидуальное задание на курсовой проект.

## 2 Рабочая программа по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»

Содержание курса представлено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Номера тем и их содержание

Номер темы	Наименование и краткое содержание темы
1	<b>7 семестр</b> <b>Общие сведения о процессах и аппаратах</b> Наука о процессах и аппаратах, ее значение на современном этапе подготовки инженеров химиков-технологов. Законы сохранения массы, энергии и импульса – основы составления балансовых уравнений (материальных и тепловых балансов, балансов действующих на систему сил и баланса количества движения). Основные типовые уравнения балансов массы, теплоты и количества движения (методы их составления, цели и способы решения). Законы переноса массы, энергии и импульса в сплошных средах – основы анализа и моделирования типовых процессов химической технологии и аналогия этих процессов.
2	<b>Моделирование химико-технологических процессов</b> Физическое моделирование: основы теории обобщенных переменных. Основы теории анализа размерностей. Математическое моделирование: статистические и детерминированные модели, принципы их формирования и направления использования. Применение компьютерных технологий для задач моделирования и решения практических задач в области процессов и аппаратов химических производств.
3	<b>Разделение неоднородных систем и перемешивание</b> Классификация неоднородных систем. Методы разделения неоднородных систем. Разделение жидких систем. Материальный расчет процесса. Отстаивание. Фильтрование. Общие сведения. Уравнения фильтрования. Конструкции фильтров. Центрифугирование. Классификация центрифуг. Конструкция центрифуг. Гидроциклоны. Перемешивание в жидкой среде. Механическое перемешивание. Пневматическое перемешивание. Пульсационное перемешивание. Псевдооживление твердого зернистого материала. Разделение газовых систем.
4	<b>Перемешивание в жидких средах</b> Механическое перемешивание. Расчет мощности, потребляемой на перемешивание. Устройство мешалок: лопастные, пропеллерные, турбинные, специальные. Пневматическое перемешивание.



5	<p><b>Тепловые процессы и аппараты</b>          Общие сведения. Расчет теплообменной аппаратуры. Конвективный теплообмен-теплоотдача. Теплопередача при постоянных температурах. Теплопередача при переменных температурах теплоносителя. Выбор взаимного направления движения теплоносителей. Расчет потерь тепла в окружающую среду. Нестационарный теплообмен. Теплообмен с зернистыми насадками и материалами.</p> <p>Источники тепла и методы нагревания. Общие сведения. Расчет теплообменника. Конструкции теплообменных аппаратов. Пути интенсификации работы теплообменного оборудования.</p> <p>Охлаждение и конденсация. Хладагенты. Конструкции конденсаторов.</p> <p>Выпаривание. Общие сведения. Материальный баланс. Тепловой баланс. Полезная разность температур расчета многокорпусной выпарной установки. Конструкции выпарных аппаратов.</p>
6	<p><b>8 семестр</b>  <b>Массообменные процессы и аппараты химической технологии</b>          Основы теории массопередачи. Способы выражения состава фаз. Равновесие при массопередаче. Правило фаз. Кривая равновесия. Материальный баланс процессов массопередачи. Скорость массопередачи. Механизм переноса. Молекулярная диффузия. Конвективная диффузия. Подобие процессов переноса массы. Уравнение массопередачи. Средняя движущая сила процесса массопередачи. Число единиц переноса. Высота единиц переноса. Расчет основных размеров массообменных аппаратов.</p> <p>Абсорбция. Общие сведения. Равновесие между фазами. Материальный баланс и расход абсорбента. Тепловой баланс. Конструкции абсорберов. Десорбция.</p> <p>Перегонка и ректификация. Схема непрерывной ректификации. Материальный баланс процесса ректификации; построение линий рабочих концентраций. Минимальное флегмовое число. Рабочее флегмовое число.</p>
7	<p><b>9 семестр</b>  <b>Массообменные процессы и аппараты химической технологии</b>          Экстрагирование. Общие сведения. Фазовое равновесие. Материальный баланс процесса экстракции. Аппаратура экстракционных установок.</p> <p>Адсорбция. Общие сведения. Адсорбенты. Принципиальные схемы и аппаратура адсорбционных процессов.</p> <p>Кристаллизация. Равновесие при кристаллизации. Скорость кристаллизации. Способы кристаллизации.</p> <p>Сушка. Общие сведения. Связь влаги с материалом. Виды сушки. Движущая сила процесса сушки. Баланс влаги в высушиваемом материале. Конвективная сушка. Основные параметры влажного газа. Диаграмма <math>I-x</math> состояния влажного газа. Кинетика процесса сушки. Конструкция сушилок.</p> <p>Процессы мембранного разделения смесей. Общая характеристика и область применения мембранных процессов.</p> <p>Механические процессы химической технологии и оборудование для их проведения.</p>

### 3 Контрольная работа 1 (Расчет кожухотрубчатого теплообменника)

#### 3.1 Задание на расчет теплообменника

Рассчитать кожухотрубчатый теплообменник для нагревания  $G$ , кг/с жидкости от температуры  $t_{2H}$ , °С до температуры  $t_{2K}$ , °С. Греющий теплоноситель – водяной пар. Давление пара  $p_{ABC}$ , ат.

В результате расчета определить:

- 1) коэффициенты теплоотдачи и коэффициент теплопередачи;
- 2) поверхность теплообмена;
- 3) основные размеры теплообменника;
- 4) толщину изоляции и тепловые потери в окружающую среду;
- 5) расход греющего пара.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 3.1.

#### 3.2 Методика расчета теплообменника

##### 3.2.1 Выбор конструктивных элементов и скорости жидкости

Учитывая условия теплообмена и удобство эксплуатации, жидкость необходимо направить по трубам, а пар – в межтрубное пространство. Скорость движения жидкости в трубах должна обеспечить достаточно интенсивный теплообмен и не вызвать сильного возрастания гидравлических сопротивлений. На основании практических данных рекомендуется принять:

- 1) скорость жидкости  $v = (0,6-0,9)$  м/с;
- 2) внутренний диаметр трубы  $d_B = (25-40)$  мм;
- 3) толщину стенки трубы  $\delta_{CT} = (2,5-4)$  мм.

Выбор размеров труб производится по таблице 3.2.

Число труб в одном ходу  $n_1$  определяется из объемного расхода теплоносителя и его скорости движения

$$V = vS = v \frac{\pi d_B^2}{4} n_1,$$

тогда

$$n_1 = \frac{1,27G}{d_B^2 \rho v}, \quad (1)$$

где  $G$  – расход жидкости, кг/с;

$d_B$  – внутренний диаметр трубы, м;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup> приведена в приложении А, таблица А.1;

$v$  – скорость жидкости, м/с.

Все физические свойства нагреваемой жидкости принимаются при определяющей температуре  $t_{2CP}$ , °С (см. приложение А, таблицы А.1 – А.4):

$$t_{2CP} = \frac{t_{2H} + t_{2K}}{2}.$$

Общее число труб в пучке (расчетное)

$$n = n_1 z_{TP}, \quad (2)$$

где  $z_{TP}$  – количество ходов в теплообменнике.

В соответствии с заданной производительностью  $z_{TP}$  принимают 2, 4, 6.

Располагая трубы по периметрам шестиугольников, выбирают по таблице 3.3 ближайшее значение  $n$  и, уточняя  $n_1$  из уравнения (2), пересчитывают скорость движения жидкости по уравнению (1). Скорость жидкости должна быть в пределах 0,6-0,9 м/с. Если  $v < 0,6$  м/с или  $v > 0,9$  м/с, то выбирают новое значение общего числа труб из таблицы 3.3, уточняют число труб в одном ходу и уточняют скорость.

### 3.2.2 Расчет среднего температурного напора

Средняя разность температур между паром и нагреваемой жидкостью  $\Delta t_{CP}$  (температурный напор) определяется как среднее логарифмическое из значений наибольшей и наименьше разности температур:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{2,3 \lg \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}},$$

где  $\Delta t_B = t_{\text{конд}} - t_{2H}$ , °С;  $\Delta t_M = t_{\text{конд}} - t_{2K}$ , °С;

$t_{\text{конд}}$  – температура конденсации пара, °С, принимается по давлению пара из приложения Б.

Если отношение  $\Delta t_B / \Delta t_M \leq 2$ , то с достаточной вероятностью можно пользоваться среднеарифметическим значением

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2}.$$

### 3.2.3 Определение коэффициента теплоотдачи от пара к стенке $\alpha_1$

В случае конденсации водяного пара на пучке  $n$  вертикальных труб высотой  $H$ , диаметром  $d_H$  среднее значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1 = 1,15 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r g}{H \mu \Delta t}}.$$

В случае конденсации водяного пара на поверхности пучка горизонтальных труб среднее значение коэффициента теплоотдачи рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1 = 1,28 \varepsilon \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 r}{d_H \mu \Delta t}},$$

где  $\varepsilon$  – поправочный коэффициент, зависящий от числа труб в вертикальном ряду (см. таблицу 3.3).

$\lambda$  – теплопроводность пленки конденсата, Вт/(м·К);

$\rho$  – плотность конденсата, кг/м<sup>3</sup>;

$r$  – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

$d_H$  – наружный диаметр труб, м;

$\mu$  – динамическая вязкость конденсата, Па·с;

$\Delta t$  – разность температур пара и стенки, °С,

$$\Delta t = t_{\text{конд}} - t_{\text{ст}}.$$

Температуру стенки рассчитывают как среднеарифметическую величину

$$t_{\text{ст}} = \frac{2t_{\text{конд}} + t_{2H} + t_{2K}}{4}.$$

Все физические свойства пленки конденсата (воды) принимаются при определяющей температуре пара  $t_{\text{конд}}$  из приложения В. Рабочую высоту вертикальной трубы принимают в пределах  $H = (2-6)$  м.

### 3.2.4 Определение коэффициента теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости $\alpha_2$

В целях определения режима движения жидкости в трубах, вычисляется критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v d_{\text{э}} \rho}{\mu},$$

где  $d_{\text{э}} = d_B$  – эквивалентный диаметр, м;  
 $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

Коэффициент теплоотдачи определяется по следующим критериальным уравнениям:

а) для турбулентного режима ( $Re > 10000$ )

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,43};$$

б) для переходного режима ( $Re = 2300 \dots 10000$ )

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} Pr^{0,43};$$

в) для ламинарного режима ( $Re < 2300$ )

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1},$$

где критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha_2 d_{\text{э}}}{\lambda};$$

критерий Прандтля

$$Pr = \frac{c\mu}{\lambda};$$

критерий Грасгофа

$$Gr = \frac{gd_B^3 \rho^2}{\mu^2} \Delta t_2 \beta,$$

где  $\Delta t_2$  – разность температур стенки и жидкости,  $\Delta t_2 = t_{CT} - t_{2CP}$ ;

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости,  $K^{-1}$  (см. приложение А, таблица А.5).

Определив критерии  $Re$ ,  $Pr$ ,  $Gr$  из критериального уравнения, находят значение критерия  $Nu$ , а затем вычисляют коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_2 = \frac{Nu \lambda}{d_B}.$$

### 3.2.5 Определение коэффициента теплопередачи

Коэффициент теплопередачи для труб  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (цилиндрических стенок), если  $d_H/d_B \leq 2$ , можно определить по формуле для плоских стенок:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + r_{CT}},$$

где  $r_{CT}$  – термическое сопротивление загрязненной стенки, (м<sup>2</sup>·К)/Вт.

Термическое сопротивление определяется следующим образом:

$$r_{CT} = \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{\delta_{ЗАГР}}{\lambda_{ЗАГР}},$$

где  $\delta_{CT}$ ,  $\delta_{ЗАГР}$  – толщина металлической стенки трубы и слоя загрязнения, м;  
 $\delta_{ЗАГР}$  – принимают 0,5...5,0 мм;  
 $\lambda_{CT}$ ,  $\lambda_{ЗАГР}$  – коэффициенты теплопроводности металлической стенки и слоя загрязнения, Вт/(м·К), приведены в приложении Г.

### 3.2.6 Расчет поверхности теплообмена и основных размеров теплообменника

Поверхность теплообмена равна

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

где  $Q$  – тепловая нагрузка теплообменника (количество переданного тепла), Вт,

$$Q = Gc(t_{2K} - t_{2H}).$$

Для определения длины труб пользуются соотношением:

$$H(l) = \frac{F}{\pi d_p n},$$

где  $n$  – общее количество труб в пучке;  
 $d_p$  – расчетный диаметр, м.

В качестве расчетного диаметра принимают:

при	$\alpha_1 > \alpha_2$	$d_p = d_B$ ;
при	$\alpha_1 \approx \alpha_2$	$d_p = 0,5(d_B + d_H)$ ;
при	$\alpha_1 < \alpha_2$	$d_p = d_H$ .

Диаметр кожуха равен

$$D_K = t(\varepsilon - 1) + 4d_H,$$

где  $\varepsilon$  – число труб по диагонали шестиугольника (см. таблицу 3.3);

$$t = (1,3 - 1,4)d_H - \text{шаг труб, м.}$$

### 3.2.7 Расчет изоляции и тепловых потерь в окружающую среду

Толщина изоляционного слоя  $\delta_{из}$ , м, определяется из уравнения

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left( \frac{1}{K_{\Pi}} - \frac{1}{\alpha_{\Pi}} \right),$$

где  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(м·К) (см. приложение Г);

$K_{\Pi}$  – коэффициент теплопередачи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$K_{\Pi} = \alpha_{\Pi} \frac{t_{из} - t_{воз}}{t_{конд} - t_{воз}};$$

$\alpha_{\Pi}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$\alpha_{\Pi} = 9,3 + 0,06t_{из},$$

где  $t_{из}$  – допустимая температура поверхности изоляции,  $t_{из} = 60^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{воз}$  – температура окружающего воздуха,  $t_{воз} = (15 - 25)^{\circ}\text{C}$ .

Определяются потери тепла в окружающую среду,  $Q_{пот}$ , Вт:

$$Q_{пот} = K_{\Pi} F_{\Pi} (t_{конд} - t_{воз}),$$

где  $F_{\Pi}$  – наружная поверхность теплообменника, м<sup>2</sup>,

$$F_{\Pi} \approx \pi D_K H + \pi \frac{D_K^2}{2}.$$

### 3.2.8 Определение расхода греющего пара

Расход греющего пара  $D$ , кг/с, определяется из уравнения теплового баланса аппарата:

$$Q_H + Q_{\Pi} = Q_K + Q_{конд} + Q_{пот},$$

где  $Q_H$  – тепло, поступающее с исходной жидкостью,  $Q_H = G c t_{2H}$ , Вт;

$Q_{II}$  – тепло, поступающее с греющим паром,  $Q_{II} = D i_{II}$ , Вт;

$Q_K$  – тепло, уходящее с нагретой жидкостью,  $Q_K = G c t_{2K}$ , Вт;

$Q_{KОНД}$  – тепло, уходящее с конденсатом греющего пара,  $Q_{KОНД} = D i_{KОНД}$ , Вт.

Из теплового баланса определяют расход греющего пара

$$D = \frac{Gc(t_{2K} - t_{2H}) + Q_{Пот}}{i_{II} - i_{KОНД}},$$

где  $i_{II}$ ,  $i_{KОНД}$  – удельные энтальпии пара и конденсата, Дж/кг, определяются по давлению греющего пара (см. приложение Б);

Результаты теплового расчета теплообменника привести в виде таблицы теплового баланса 3.4.

Таблица 3.1 – Исходные данные для расчета кожухотрубчатого теплообменника

Последняя цифра номера зачетной книжки	Начальная температура жидкости, °С	Конечная температура жидкости, °С	Давление пара, ат	Тип аппарата
0	30	75	1,5	Горизонтальное расположение
1	21	73	1,1	
2	31	72	1,8	Вертикальное расположение
3	29	70	1,3	
4	20	100	2,0	Горизонтальное расположение
5	20	100	4,0	
6	20	100	5,0	Вертикальное расположение
7	25	100	2,4	
8	21	91	1,9	Горизонтальное расположение
9	23	93	2,7	



Окончание таблицы 3.1

Исходные данные	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нагреваемая жидкость	Этиловый спирт				H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>			Уксусная кислота		
Производительность по жидкости, кг/с	6,0	7,0	5,0	4,0	5,0	10	2,5	5,0	4,0	3,0
Концентрация раствора, %	20	20	40	60	60	60	60	50	50	50

Таблица 3.2 – Трубы стальные горячекатаные ГОСТ 8732-70

Наружный диаметр $d_H$ , мм	Толщина стенки $\delta_{ст}$ , мм		Наружный диаметр $d_H$ , мм	Толщина стенки $\delta_{ст}$ , мм	
	от	до		от	до
25	2,5	8	63,6	3,0	14
28	2,5	8	68	3,0	16
32	2,5	8	70	3,0	16
38	2,5	8	73	3,0	19
42	2,5	10	76	3,0	19
45	2,5	10	83	3,5	19
50	2,5	10	89	3,5	24
54	3,0	11	95	3,5	24
57	3,0	13	102	3,5	24
60	3,0	14	108	4,0	28

Таблица 3.3 – Число труб, размещаемых в трубной доске по шестиугольникам

Число труб по диагонали 6-ти угольника	Число труб в пучке без учета сегмента	Общее число труб в пучке	Поправочный коэффициент, $\varepsilon$	Число труб по диагонали 6-ти угольника	Число труб в пучке без учета сегмента	Общее число труб в пучке	Поправочный коэффициент, $\varepsilon$
3	7	7	0,90	23	397	439	0,54
5	19	19	0,80	25	469	517	0,53
7	37	37	0,72	27	547	613	0,52
9	61	61	0,68	29	631	721	0,51
11	91	91	0,65	31	721	823	0,51
13	127	127	0,62	33	817	931	0,50
15	169	187	0,60	35	919	1045	0,49
17	217	241	0,58	37	1027	1165	0,48
19	271	301	0,57	39	1141	1303	0,47
21	331	367	0,56	41	1261	1459	0,47

Таблица 3.4 – Тепловой баланс

Приход тепла			Расход тепла		
Статьи прихода	Кол-во тепла, Вт	%	Статьи расхода	Кол-во тепла, Вт	%
1 С греющим паром $Q_{II} = D i_{II}$ ,	.....	....	1 С конденсатом $Q_{конд} = D i_{конд}$	.....	....
2 С исходной жидкостью $Q_{H} = G c t_{H}$ ,	.....	....	2 С нагретой жидкостью $Q_{K} = G c t_{K}$ ,	.....	....
			3 Потери тепла $Q_{Пот}$	.....	....
Итого	.....	100	Итого	.....	100

## 4 Контрольная работа 2 (Расчет выпарного аппарата)

### 4.1 Задание на расчет выпарного аппарата

Расчитать выпарной аппарат для выпаривания  $G_H$ , кг/ч раствора от начальной концентрации  $x_H$ , % до конечной  $x_K$ ,%. Давление греющего пара  $p_{АБС}$ , ат. Абсолютное давление в аппарате  $p_{В.П}$ , ат.

В результате расчета определить:

- 1) количество выпаренной воды;
- 2) коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи;
- 3) расход греющего пара;
- 4) площадь поверхности нагрева;
- 5) выполнить эскиз выпарного аппарата с естественной циркуляцией раствора, с вынесенной циркуляционной трубой или вынесенной греющей камерой, показав на нем стрелками движения потоков раствора, пара.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 4.1.

### 4.2 Методика расчета выпарного аппарата

#### 4.2.1 Определение количества выпаренной воды

Количество выпаренной воды  $W$ , кг/с, определяется из уравнения материального баланса по следующей формуле:

$$W = G_H \left( 1 - \frac{x_H}{x_K} \right).$$

Тогда количество упаренного раствора равно:

$$G_K = G_H - W.$$

#### 4.2.2 Определение температур греющего, вторичного пара и температурных потерь

По давлению греющего пара и вторичного пара определяются их температуры  $t_{кОНД}$  и  $t_{В.П}$  (см. приложение Б).

Температурные потери определяются по формуле:

$$\sum \Delta = \Delta + \Delta'.$$

Температурная депрессия  $\Delta$  определяется по формуле Тищенко:

$$\Delta = \eta \Delta_H,$$

где  $\Delta_H$  – нормальная депрессия, вычисленная при атмосферном давлении,  $^{\circ}\text{C}$ ;  
 $\eta$  – поправочный коэффициент, зависящий от давления вторичного пара.

Значения  $\Delta_H$  и  $\eta$  принимаются из таблиц 4.2, 4.3.

Гидростатическая депрессия  $\Delta'$  определяется как разность температур кипения воды в среднем сечении и на поверхности

$$\Delta' = t' - t_{в.п.}$$

Для определения температуры кипения воды в среднем сечении определяется гидростатическое давление в среднем слое раствора  $\Delta p$ , ат:

$$\Delta p = 9,81 \cdot 10^{-5} \frac{\rho l}{2},$$

где  $\rho$  – плотность раствора в данном корпусе,  $\text{кг}/\text{м}^3$  (определяется по концентрации раствора и температуре вторичного пара, см. приложение А, таблица А.1);

$l$  – длина трубок, м (принимается в пределах (2-4) м).

Для определения давления в среднем слое раствора к давлению вторичного пара в данном корпусе прибавляется вычисленное гидростатическое давление  $p_{ср}$ , ат:

$$p_{ср} = p_{в.п.} + \Delta p.$$

Для этого давления находится температура кипения воды  $t'$  в среднем сечении трубок (см. приложение В).

### 4.2.3 Расчет температуры кипения раствора и полезной разности температур

Температура кипения раствора  $t_{кип}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  определяется по следующей формуле:

$$t_{кип} = t_{в.п.} + \sum \Delta.$$

Полезная разность температур  $\Delta t_{полез}$ ,  $^{\circ}\text{C}$  определяется по следующей формуле:

$$\Delta t_{полез} = t_{конд} - t_{кип}.$$

#### 4.2.4 Расчет коэффициентов теплоотдачи

Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) рассчитывается по формуле:

$$\alpha_1 = \frac{A_1}{(ql)^{1/3}},$$

где  $A_1$  – расчетный коэффициент, определяемый по температуре греющего пара из рисунка 4.1;

$q$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$l$  – длина трубок, м.

Коэффициент теплоотдачи от стенки к кипящему раствору  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_2 = A_2 q^{0,6},$$

где  $A_2$  – расчетный коэффициент, зависящий от температуры кипения и концентрации раствора, определяется по рисунку 4.2.

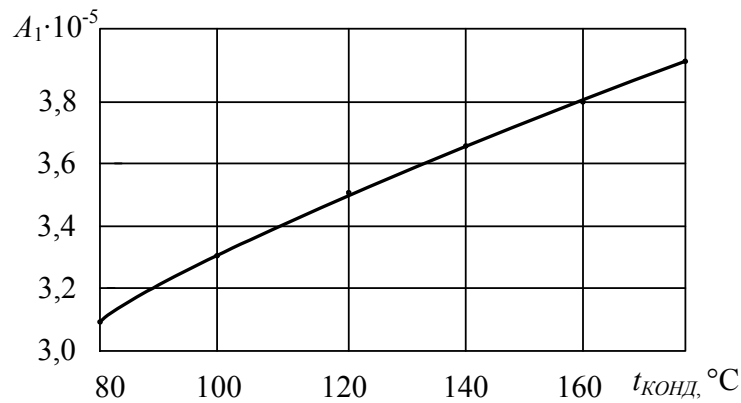


Рисунок 4.1 – Значение расчетного коэффициента  $A_1$

Так как плотность теплового потока неизвестна, задаются несколькими значениями  $q$  (порядка 5000...25000 Вт/м<sup>2</sup>), и вычисляют  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

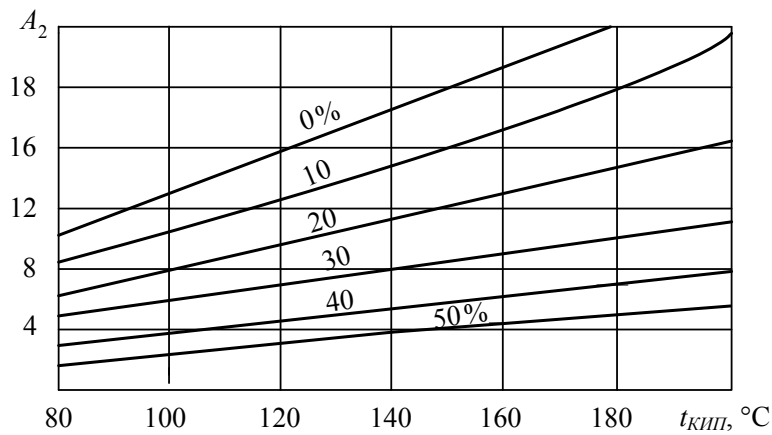


Рисунок 4.2 – Значения расчетного коэффициента  $A_2$  для растворов солей

#### 4.2.5 Расчет коэффициента теплопередачи

По значениям коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  рассчитывают коэффициент теплопередачи  $K$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где  $\sum r$  – сумма термических сопротивлений стенки и загрязнений на ней, (м<sup>2</sup>·К)/Вт,

$$\sum r = \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + \frac{\delta_{ЗАГР}}{\lambda_{ЗАГР}},$$

$\delta_{СТ}$ ,  $\delta_{ЗАГР}$  – толщина соответственно металлической стенки трубки и слоя загрязнений, м (принимают  $\delta_{СТ} = 2$  мм,  $\delta_{ЗАГР} = (0,5-1,5)$  мм);

$\lambda_{СТ}$ ,  $\lambda_{ЗАГР}$  – коэффициенты теплопроводности металлической стенки и слоя загрязнений, Вт/(м·К) (см. приложение Г).

Далее определяют температурный напор по формуле:

$$\Delta t = \frac{q}{K},$$

где  $q$  – принятое ранее значение (5000-25000 Вт/м<sup>2</sup>);

$K$  – рассчитанный при этих значениях коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Строится нагрузочная характеристика, представляющая зависимость  $q = f(\Delta t)$  (рисунок 4.3).

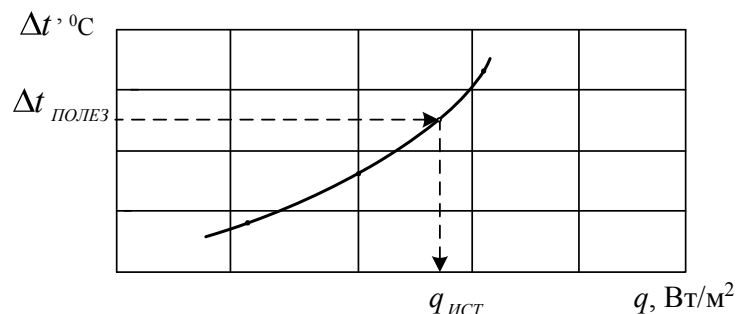


Рисунок 4.3 – Нагрузочная характеристика выпарного аппарата

По известной величине полезной разности температур находится истинное значение удельного теплового потока  $q_{ИСТ}$  и определяется коэффициент теплопередачи:

$$K_{РАСЧ} = \frac{q_{ИСТ}}{\Delta t_{ПОЛЕЗ}}.$$

#### 4.2.6 Определение площади поверхности нагрева и расхода греющего пара

Площадь поверхности нагрева  $F$  рассчитывают из основного уравнения теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{K_{РАСЧ} \Delta t_{ПОЛЕЗ}}.$$

Расход греющего пара  $D$  и тепловую нагрузку аппарата  $Q$  определяют из уравнения теплового баланса:

$$Q_H + Q_{II} = Q_K + Q_{КОНД} + Q_{В.П} + Q_{ПОТ},$$

где  $Q_H$  – тепло, поступающее с исходным раствором,  $Q_H = G_H c_H t_H$ , Вт;

$Q_{II}$  – тепло, поступающее с греющим паром,  $Q_{II} = D i_{II}$ , Вт;

$Q_K$  – тепло, уходящее с упаренным раствором,  $Q_K = G_K c_K t_K$  Вт;

$Q_{КОНД}$  – тепло, уходящее с конденсатом греющего пара,  $Q_{КОНД} = D i_{КОНД}$ , Вт;

$Q_{В.П}$  – тепло, уходящее со вторичным паром,  $Q_{В.П} = W i_W$ , Вт;

$Q_{ПОТ}$  – потери тепла в окружающую среду,  $Q_{ПОТ} = (0,03 - 0,05) Q$ , Вт.

Из теплового баланса определяют расход греющего пара

$$D = \frac{Q_K + Q_W - Q_H}{(0,97 - 0,95) r}$$

и тепловую нагрузку аппарата:

$$Q = D(i_{II} - i_{конд}) = Dr,$$

где  $r$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг, определяется по давлению греющего пара (см. приложение Б).

Результаты теплового расчета привести в виде таблицы теплового баланса 4.4.

#### 4.2.7 Расчет толщины тепловой изоляции

Толщина изоляционного слоя  $\delta_{из}$ , м, определяется из уравнения:

$$\delta_{из} = \lambda_{из} \left( \frac{1}{K_{II}} - \frac{1}{\alpha_{II}} \right),$$

где  $\lambda_{из}$  – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, Вт/(м·К), (см.приложение Г);

$K_{II}$  – коэффициент теплопередачи в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$K_{II} = \alpha_{II} \frac{t_{из} - t_{воз}}{t_{конд} - t_{воз}},$$

$\alpha_{II}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$$\alpha_{II} = 9,3 + 0,06t_{из},$$

где  $t_{из}$  – допустимая температура поверхности изоляции,  $t_{из} = 60$  °С;

$t_{воз}$  – температура окружающего воздуха,  $t_{воз} = (15 - 25)$  °С.



Таблица 4.1 – Исходные данные для расчета выпарного аппарата

Последняя цифра номера зачетной книжки	Растворенное вещество	Количество исходного раствора $G_H$ , кг/ч	Начальная концентрация раствора $x_H$ , %	Конечная концентрация раствора $x_K$ , %						
0	<i>NaOH</i>	5000	14,0	20,0						
1	<i>NaOH</i>	5500	14,5	20,5						
2	<i>NaOH</i>	2500	15,0	23,0						
3	<i>NaOH</i>	4000	16,0	21,5						
4	<i>NaCl</i>	3500	8,5	16,5						
5	<i>NaCl</i>	4200	10,0	18,5						
6	<i>NaCl</i>	4500	12,0	19,0						
7	<i>CaCl<sub>2</sub></i>	5000	12,5	21,0						
8	<i>CaCl<sub>2</sub></i>	5300	13,5	20,5						
9	<i>CaCl<sub>2</sub></i>	5500	14,0	21,5						
	Предпоследняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_{ABC}$ , ат	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8
$P_{B.П.}$ , ат	0,15	0,17	0,19	0,20	0,22	0,16	0,18	0,21	0,24	0,23

Таблица 4.2 – Значение нормальной депрессии для водных растворов различных веществ  $\Delta_H$ , °С

Растворенное вещество	Концентрация, %										
	10	20	30	35	40	45	50	55	60	65	70
<i>NaCl</i>	1,9	4,9	9,6								
<i>CaCl<sub>2</sub></i>	1,5	4,5	10,5	14,3	19	24,3	30	36,5	43,0		
<i>NaOH</i>	3,0	8,0	9,0	20	30	35	40	45	60	65	80

Таблица 4.3 – Поправочный коэффициент в формуле Тищенко

Абсолютное давление	$\eta$
0,06	0,64
0,08	0,66
0,1	0,69
0,15	0,73
0,2	0,76
0,3	0,81
0,4	0,85
0,5	0,89
0,6	0,91
0,8	0,96
1,0	1,00

Таблица 4.4 – Тепловой баланс

Приход			Расход		
Статьи прихода	Кол-во тепла, Вт	%	Статьи расхода	Кол-во тепла, Вт	%
1 С исходным раствором, $Q_H = G_H c_H t_H$ ,	.....	....	1 С упаренным раствором, $Q_K = G_K c_K t_K$ ,	.....	....
2 С греющим паром, $Q_{II} = D i_{II}$ ,	.....	....	2 С конденсатом греющего пара, $Q_{конд} = D i_{конд}$	.....	....
			3 С вторичным паром, $Q_W = W i_W$ ,	.....	....
			4 Потери тепла, $Q_{пот}$	.....	....
Итого	.....	100	Итого	.....	100

## 5 Контрольная работа 3 (Расчет ректификационной колонны)

### 5.1 Задание на расчет колонны

Произвести расчет ректификационной колонны непрерывного действия для перегонки  $G_f$ , кг/ч, двойной смеси, содержащей  $a_f$  компонента  $A$  (НКК). Дистиллят должен содержать  $a_p$  компонента  $A$ , а кубовой остаток –  $a_w$  компонента  $A$ . Смесь подается в колонну при температуре кипения. Температура охлаждающей воды –  $t_{вн}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , температура охлажденного дистиллята –  $t_k$ ,  $^{\circ}\text{C}$ . Куб обогревается насыщенным паром с давлением  $p_{АБС}$ , ат.

В результате расчета определить:

- 1) число тарелок графическим методом;
- 2) количество дистиллята и кубового остатка;
- 3) расход греющего пара;
- 4) расход воды в дефлегматоре и конденсаторе;
- 5) диаметр и высоту колонны.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.1.

### 5.2 Методика расчета колонны

#### 5.2.1 Определение числа тарелок графическим методом

Заданные составы начальной смеси, дистиллята и кубового остатка выражают в мольных процентах:

$$x_f = \frac{\frac{a_f}{M_a}}{\frac{a_f}{M_a} + \frac{100 - a_f}{M_b}} 100\%,$$

$$x_p = \frac{\frac{a_p}{M_a}}{\frac{a_p}{M_a} + \frac{100 - a_p}{M_b}} 100\%,$$

$$x_w = \frac{\frac{a_w}{M_a}}{\frac{a_w}{M_a} + \frac{100 - a_w}{M_b}} 100\%,$$

где  $M_a, M_b$  – молекулярные массы компонентов, кг/кмоль.

Пользуясь данными таблицы 5.2, на миллиметровой бумаге строят кривую равновесия в координатах  $y$ - $x$ . На графике наносят точки  $a$  и  $c$  соответствующие составам  $x_p = y_p$ ,  $x_w = y_w$ , и вертикальную линию,  $x_f$  до пересечения с кривой равновесия, приведенной на рисунке 5.1.

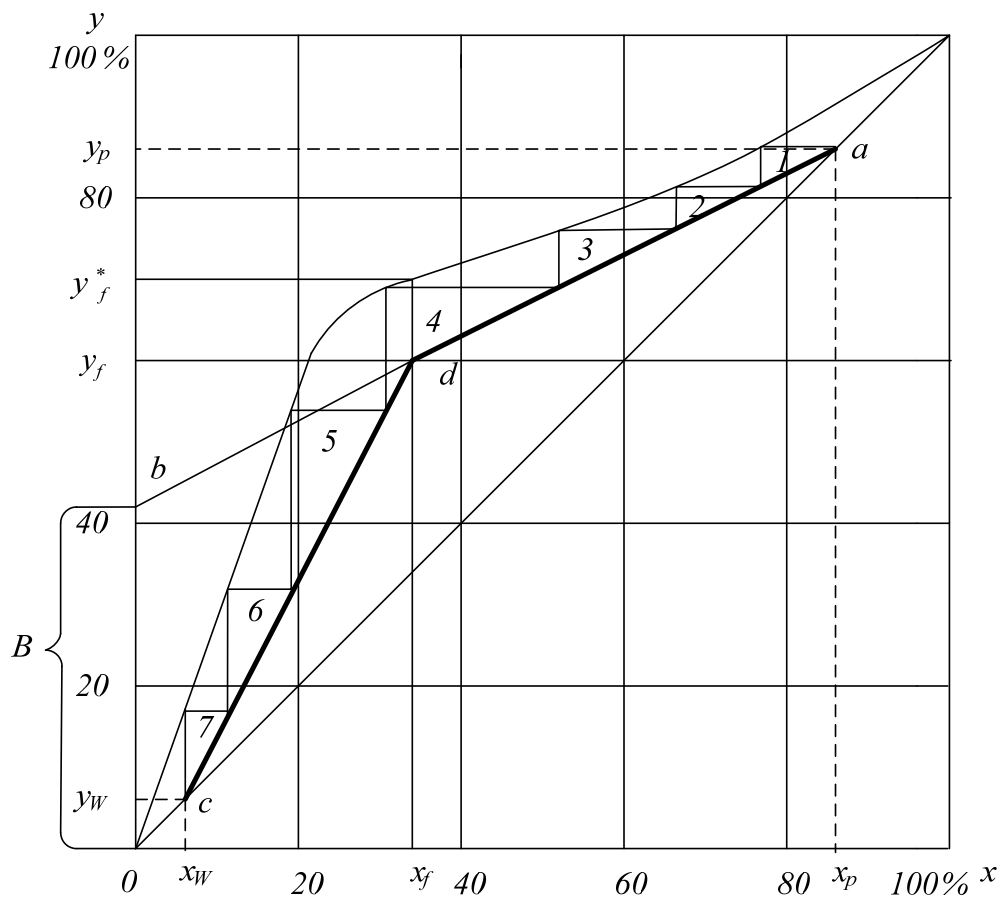


Рисунок 5.1 – Определение числа теоретических тарелок графическим методом

Определяется минимальное флегмовое число

$$R_{\min} = \frac{x_p - y_f^*}{y_f^* - x_f}$$

где  $y_f^*$  – состав пара равновесного с начальной смесью.

Рабочее флегмовое число равно

$$R = \beta R_{\min}$$

где  $\beta$  – коэффициент избытка флегмы,  $\beta = 1,5-2,5$ .

Рабочая линия укрепляющей части колонны проводится через точку  $a$ , лежащую на диагонали и вершину отрезка  $Ob$ , отложенного на оси координат, равного

$$B = \frac{x_p}{R + 1}.$$

Рабочая линия исчерпывающей части колонны проводится через точку  $c$ , лежащую на диагонали и точку  $d$ , полученную пересечением рабочей линии укрепляющей части колонны с вертикалью  $x = x_f$ . Проводя из точки  $a$  последовательно горизонталь и вертикаль между кривой равновесия и рабочими линиями, получают ряд ступеней (ступени изменения концентрации), число которых дает число теоретических тарелок  $N_T$ . Число действительных тарелок  $N_d$  определяется из уравнения

$$N_d = \frac{N_T}{\eta_T},$$

где  $\eta_T$  – общий коэффициент полезного действия тарелки в колонне.

Величина  $\eta_T$  приближенно определяется из уравнения

$$\eta_T = 0,49(\mu_{см}\alpha)^{-0,245},$$

где  $\mu_{см}$  – вязкость жидкости на питательной тарелке, мПа; определяется как вязкость смеси по правилу аддитивности

$$\mu_{см} = \mu_a \frac{x_f}{100} + \mu_b \frac{100 - x_f}{100},$$

где  $\mu_a$ ,  $\mu_b$  – вязкости отдельных компонентов, мПа; находятся по температуре  $t_f$  на питательной тарелке (см. приложения А, В);  
 $\alpha$  – относительная летучесть начальной смеси,

$$\alpha = \frac{y_f(100 - x_f)}{x_f(100 - y_f)}.$$

### 5.2.2 Определение количества дистиллята и кубового остатка

Количество дистиллята  $G_p$  и кубового остатка  $G_W$  определяются из уравнения материального баланса:

– баланс по потокам:

$$G_f = G_p + G_W;$$

– баланс по компоненту  $A$ :

$$G_f a_f = G_p a_p + G_W a_W,$$

тогда

$$G_p = G_f \frac{a_f - a_W}{a_p - a_W},$$

$$G_W = G_f \frac{a_p - a_f}{a_p - a_W},$$

где  $G_f$  – количество начальной смеси, кг/с.

Результаты материального расчета привести в виде таблицы материального баланса 5.3.

### 5.2.3 Определение расхода греющего пара

Расход греющего пара в колонне определяется из уравнения теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_4 + Q_5 + Q_6,$$

где  $Q_1$  – тепло, отданное греющим паром, Вт,

$$Q_1 = D(i_{п} - i_{конд});$$

$Q_2$  – тепло, вносимое начальной смесью, Вт,

$$Q_2 = G_f c_f t_f;$$

$Q_3$  – тепло, вносимое флегмой, Вт,

$$Q_3 = G_p R c_p t_p;$$

$Q_4$  – тепло, уносимое парами, поднимающимися с верхней тарелки, Вт,

$$Q_4 = G_p (R + 1)(r_p + c_p t_p);$$

$Q_5$  – тепло, уносимое кубовым остатком, Вт,

$$Q_5 = G_W c_W t_W;$$

$Q_6$  – потери тепла в окружающую среду, Вт,

$$Q_6 = (0,02 - 0,03) Q_1;$$

$t_f, t_p, t_w$  – температуры кипения начальной смеси, дистиллята и кубового остатка, °С; принимаются по таблице 5.2 в зависимости от состава;

$c_f, c_p, c_w$  – теплоемкости начальной смеси, дистиллята и кубового остатка, Дж/(кг·К); определяются как теплоемкости смеси по правилу аддитивности, например:

$$c_f = c_a \frac{a_f}{100} + c_b \frac{100 - a_f}{100},$$

$c_a, c_b$  – теплоемкости чистых компонентов, найденные при соответствующих температурах, Дж/(кг·К) (см. приложение А, В);

$D$  – расход греющего пара, кг/с;

$i_{п}, i_{конд}$  – энтальпии пара и конденсата, Дж/кг (см. приложение Б);

$r_p$  – удельная теплота парообразования смеси на верхней тарелке, Дж/кг,

$$r_p = r_a \frac{a_p}{100} + r_b \frac{100 - a_p}{100},$$

$r_a, r_b$  – удельные теплоты парообразования компонентов, Дж/кг, приведены в таблице 5.4.

Результаты теплового расчета привести в виде таблицы теплового баланса 5.5.

#### 5.2.4 Определение расхода воды в дефлегматоре и конденсаторе

Расход воды в дефлегматоре  $W_6$ , кг/с:

$$W_6 = \frac{G_p R r_p}{c_{H_2O} (t_{6к} - t_{6н})}.$$

Расход воды в конденсаторе  $W_к$ , кг/с:

$$W_к = \frac{G_p (r_p + c_p (t_p - t_к))}{c_{H_2O} (t_{кк} - t_{кн})},$$

$$t_{кк} = t_{кн} + (15 - 20),$$

где  $t_{\text{вк}}$  – температура воды на выходе из дефлегматора и конденсатора, °С.

### 5.2.5 Определение диаметра и высоты колонны

Диаметр колонны определяется отдельно для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны по следующей формуле:

$$D_{\text{к}} = 1,13 \sqrt{\frac{G_p (R+1)}{\rho_n v_n}},$$

где  $v_n$  – скорость пара в свободном сечении колонны, м/с;

$\rho_n$  – средняя плотность пара перегоняемой смеси, кг/м<sup>3</sup>,

$$\rho_n = \frac{p}{R_{\Gamma} T},$$

$p$  – абсолютное давление в колонне, Па; колонна работает при атмосферном давлении  $p = 98100$  Па;

$R_{\Gamma}$  – газовая постоянная паровой смеси, Дж/(кг·К),

$$R_{\Gamma} = \frac{8314}{M_{\text{ср}}},$$

$M_{\text{ср}}$  – средняя молекулярная масса пара, кг/кмоль.

Средняя молекулярная масса пара определяется по следующей формуле:

$$M_{\text{ср}} = M_a \frac{y_{\text{ср}}}{100} + M_{\text{в}} \left( \frac{100 - y_{\text{ср}}}{100} \right),$$

где  $M_a$ ,  $M_{\text{в}}$  – молекулярные массы компонентов, кг/кмоль;

$y_{\text{ср}}$  – средний состав пара, моль %;

$T$  – средняя абсолютная температура, К,

$$T = 273 + t_{\text{ср}}.$$

Для укрепляющей части

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_f + t_p}{2}, \quad y_{\text{ср}} = \frac{y_f + y_p}{2}.$$



Для исчерпывающей части

$$t_{cp} = \frac{t_f + t_W}{2}, \quad y_{cp} = \frac{y_f + y_W}{2}.$$

Скорость пара  $v_n$  определяется в зависимости от расстояния между тарелками  $H_T$ , соотношения плотности пара и жидкости  $\rho_n / \rho_{ж}$  по графику, приведенному на рисунке 5.2. Расстояние между тарелками принимается из соотношения, приведенного в таблице 5.6.

Диаметр колонны предварительно берется в пределах (0,8-1,6) м. Если после расчета диаметр колонны не будет лежать в пределах (0,8-1,6) м, то величина  $H_T$  принимается снова, а диаметр колонны пересчитывается.

Плотность жидкости определяется по средней массовой концентрации для укрепляющей и исчерпывающей частей колонны

$$\rho_{ж} = \frac{100\rho_a\rho_v}{\rho_v a_{cp} + \rho_a(100 - a_{cp})},$$

для укрепляющей части

$$a_{cp} = \frac{a_p + a_f}{2},$$

для исчерпывающей части

$$a_{cp} = \frac{a_W + a_f}{2},$$

где  $\rho_a, \rho_v$  – плотности компонентов в жидком состоянии при средней температуре, кг/м<sup>3</sup> (см. приложение А).

Высота колонны

$$H = H_T N_D.$$

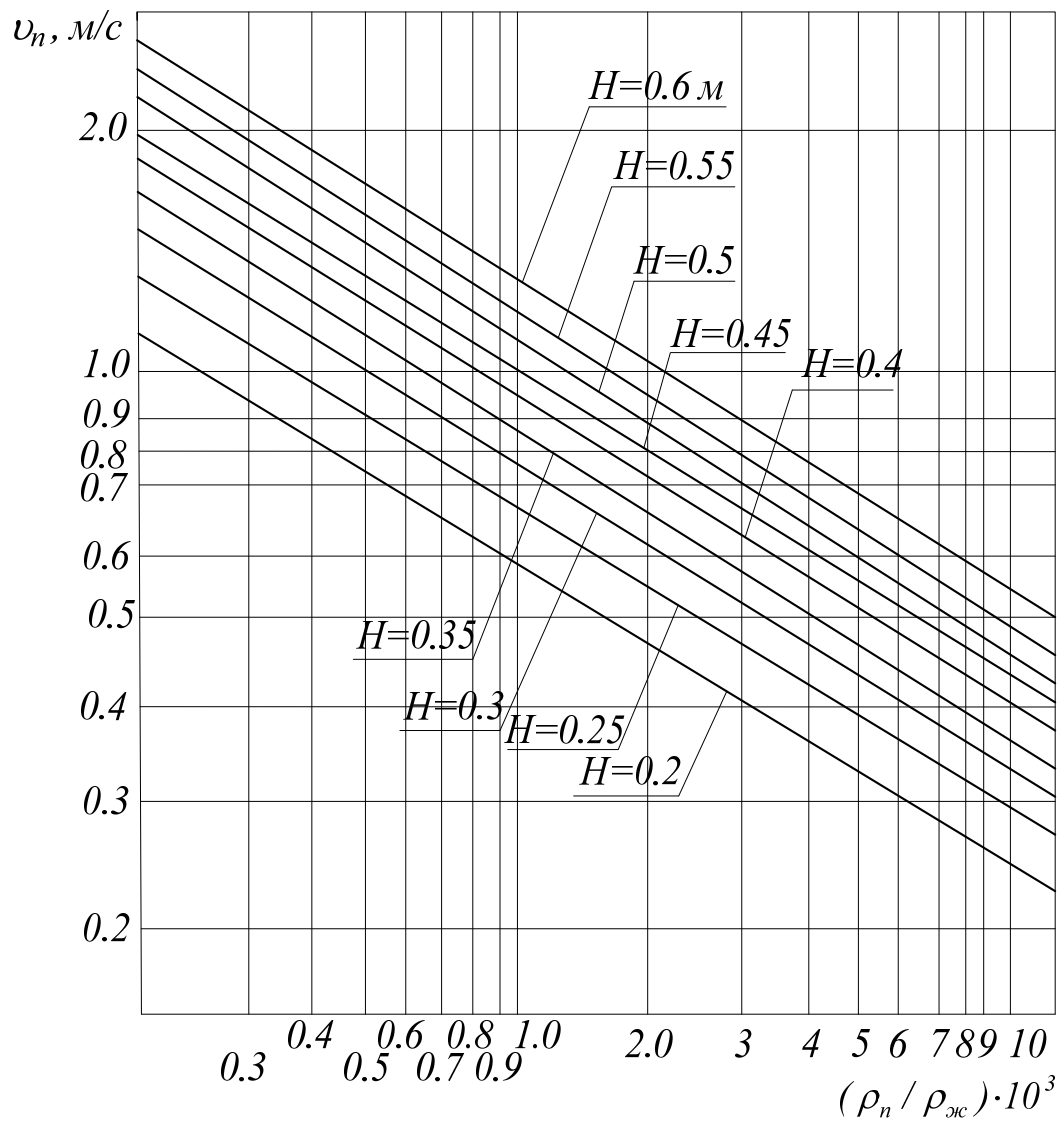


Рисунок 5.2 – Зависимость предельной скорости пара от отношения плотностей пара и жидкости

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета ректификационной колонны

Последняя цифра номера зачетной книжки	Компонент		$a_f$ , % масс.	$a_p$ , % масс.	$a_w$ , % масс.	$t_{гн}$ , °C	$t_{гк}$ , °C			
	А	В								
0	Этиловый спирт	Вода	27	83	1,7	20	30			
1	Этиловый спирт	Вода	24	85	1,5	26	32			
2	Этиловый спирт	Вода	17	90	1,1	20	30			
3	Этиловый спирт	Вода	26	92	1,1	18	32			
4	Этиловый спирт	Вода	20	89,5	1,7	20	29			
5	Вода	Уксусная кислота	35	81	1,6	16	31			
6	Вода	Уксусная кислота	30	85	1,5	18	28			
7	Вода	Уксусная кислота	34	87	1,8	17	32			
8	Вода	Уксусная кислота	38	90	1,2	21	34			
9	Вода	Уксусная кислота	32	85	1,7	19	35			
Предпоследняя цифра номера зачетной книжки										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Расход исходной смеси $G_f$ , кг/ч	600	550	650	700	750	500	520	620	720	580
Давление пара $p_{ABC}$ , ат	2,5	2,8	3,1	2,0	2,3	3,2	3,5	4,4	3,8	4,0

Таблица 5.2 – Равновесные составы бинарных смесей при атмосферном давлении

Компоненты		x, моль%	y, моль%	t, °C
А	В			
Вода ( $M_a = 18$ кг/кмоль)	Уксусная кислота ( $M_b = 60$ кг/кмоль)	0	0	118,1
		5	9,2	115,4
		10	16,7	113,8
		20	30,3	110,1
		30	42,5	107,5
		40	53,0	105,8
		50	62,6	104,4
		60	71,6	103,3
		70	79,5	102,1
		80	86,4	101,3
		90	93,0	100,6
		100	100,0	100,0
Компоненты		x, моль%	y, моль%	t, °C
А	В			
Этиловый спирт $M_a = 46.1$ кг/кмоль $a_m = 95.6\%$ $x_m = 89.4\%$ $t_m = 78.15\%$	Вода $M_b = 18$ кг/кмоль	0	0	100,0
		5	33,2	90,5
		10	44,2	86,5
		20	53,1	83,2
		30	57,6	81,7
		40	61,4	80,8
		50	65,4	80
		60	69,9	79,4
		70	75,3	79,0
		80	81,8	78,6
		90	89,8	78,4
		100	100	78,4

Таблица 5.3 – Материальный баланс

Приход			Расход		
Статьи прихода	Кол-во, кг/с	%	Статьи расхода	Кол-во, кг/с	%
1 Исх. смесь, $G_f$	.....	....	1 Дистиллят, $G_p$	.....	....
			2 Куб. остаток, $G_W$	.....	....
Итого	.....	100	Итого	.....	100

Таблица 5.4 – Удельная теплота парообразования  $r$ , кДж/кг

Вещество	Температура, °С							
	0	20	40	60	80	100	120	140
Уксусная кислота	-	352	365	375	384	390	405	396
Этиловый спирт	920	910	900	877	850	810	760	710
Вода	2493	2448	2403	2357	2310	2260	2207	2150

Таблица 5.5 – Тепловой баланс

Приход			Расход		
Статьи прихода	Кол-во, Вт	%	Статьи расхода	Кол-во, Вт	%
1 Тепло, отданное гр. паром, $Q_1 = D(i_n - i_k)$	.....	....	1 Тепло, уносимое парами, $Q_4 = G_p(R+1)(r_p + c_p t_p)$	....	....
2 Тепло, вносимое нач. смесью, $Q_2 = G_f c_f t_f$	.....	....	2 Тепло, уносимое кубовым остатком, $Q_5 = G_w c_w t_w$	.....	....
3 Тепло, вносимое флегмой, $Q_3 = G_p R c_p t_p$	.....	....	3 Потери тепла в окр. среду, $Q_6 = (0,02...0,03)Q_1$	.....	....
Итого		100	Итого		100

Таблица 5.6 – Соотношения между диаметром колонны и расстоянием между тарелками

$D_k$ , м	<0,8	0,8-1,6	1,6-2,0	2,0-2,4	2,4
$H_T$ , м	0,20-0,25	0,25-0,40	0,4-0,6	0,5-0,6	0,6

## 6 Контрольная работа 4 (Расчет барабанной конвективной сушилки)

### 6.1 Задание на расчет сушилки

Рассчитать воздушную сушилку барабанного типа для высушивания  $G_H$ , кг/ч, влажного материала. Начальная влажность материала  $w_H$ , %, конечная –  $w_K$ , %. Температура поступающего материала  $t_H$ , °С. Расчет произвести отдельно для летних и зимних условий.

В результате расчета определить:

- 1) удельные и полные расходы воздуха и тепла;
- 2) основные размеры и число оборотов барабана;
- 3) продолжительность сушки;
- 4) дать схематическое изображение процесса сушки на  $I$ -х диаграмме. Выполнить эскиз барабана сушилки (в масштабе).

Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.1, схема сушилки – на рисунке 6.1.

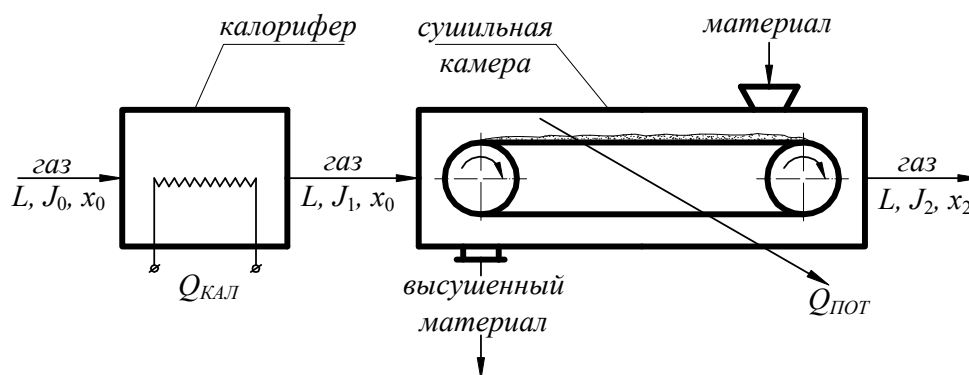


Рисунок 6.1 – Схема барабанной конвективной сушилки

### 6.2 Методика расчета сушилки

#### 6.2.1 Определение влаги, удаляемой в процессе сушки

Количество влаги  $W$ , кг/с, удаляемой в процессе сушки, при изменении влажности материала от  $w_H$  до  $w_K$  (в процентах от общей массы) определяется из материального баланса сушилки:

– баланс по потокам:

$$G_H = G_K + W ;$$

– баланс по влаге:

$$W_H = W_K + W ,$$

$$G_H w_H = G_K w_K + W,$$

тогда  $W$  и  $G_K$  равны:

$$W = G_H \frac{w_H - w_K}{100 - w_K},$$
$$G_K = G_H - W,$$

где  $G_H$  – производительность по влажному материалу, кг/с;

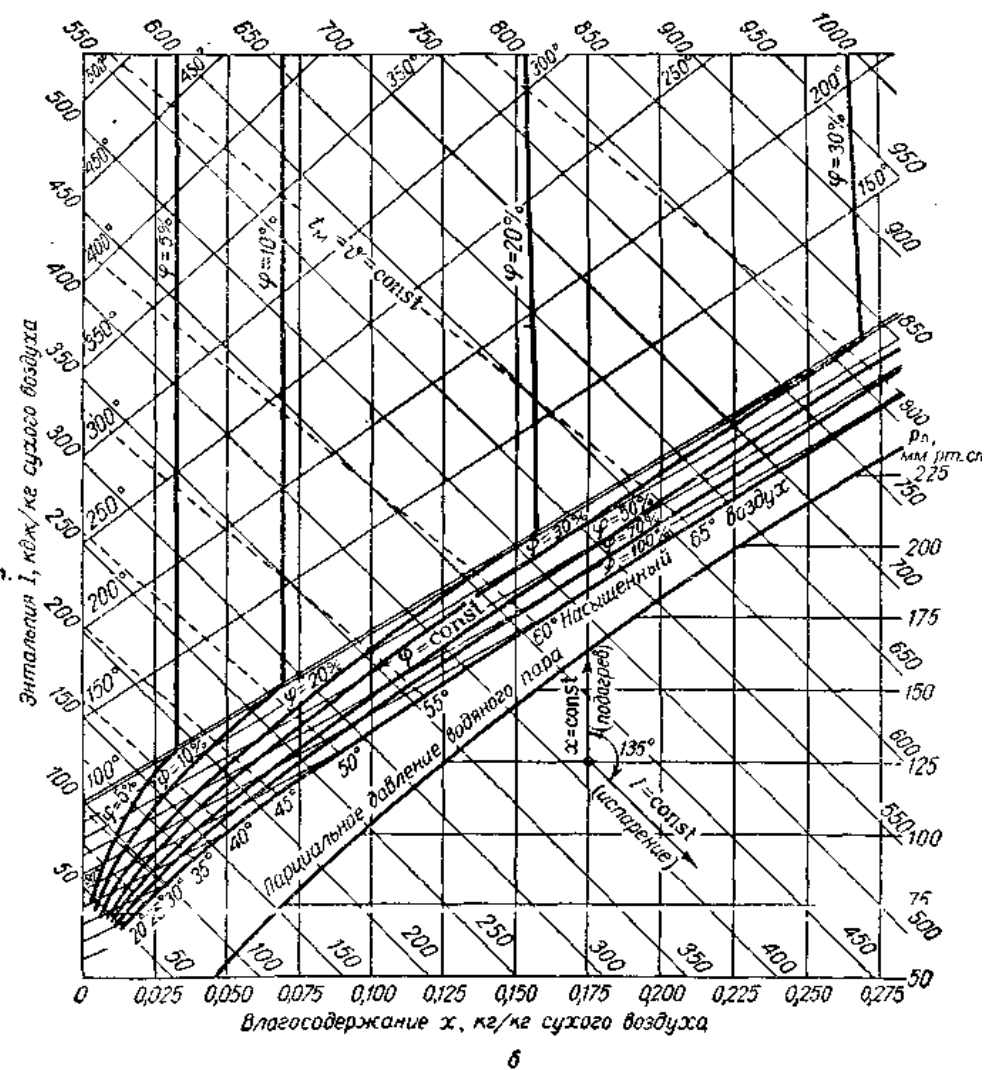
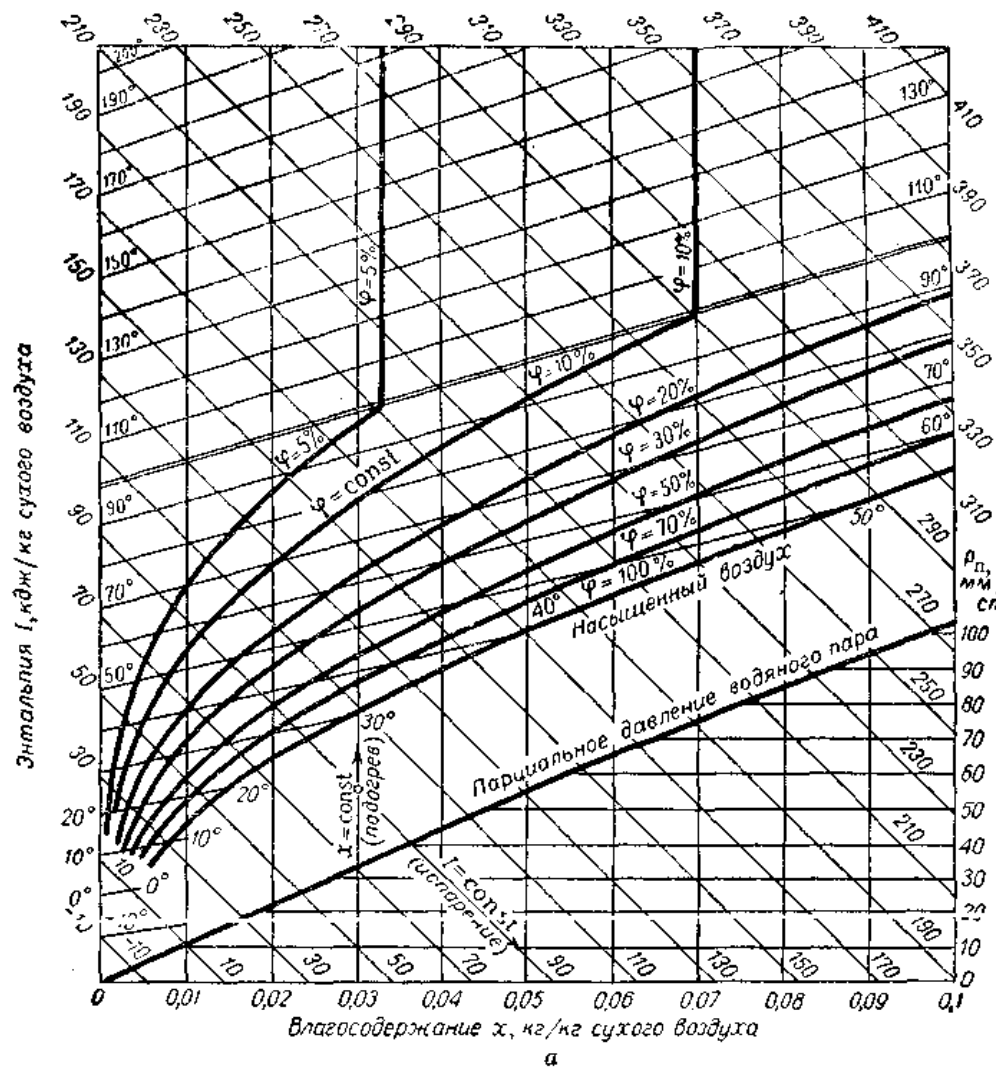
$G_K$  – производительность по высушенному материалу, кг/с.

Результаты материального расчета привести в виде таблицы материального баланса 6.2.

### 6.2.2 Нахождение параметров воздуха

Из таблицы 6.3 для заданного географического пункта берется температура  $t_0$ , °С, и относительная влажность  $\varphi_0$ , %, атмосферного воздуха. По этим данным на  $I$ - $x$  диаграмме Рамзина, приведенной на рисунке 6.2, наносится точка  $A$ , характеризующая состояние атмосферного воздуха, и из диаграммы определяются влагосодержание  $x_0$  и энтальпия  $I_0$ . Изображение процесса сушки (теоретического и действительного) на  $I$ - $x$  диаграмме представлено на рисунке 6.3.

Из точки  $A$  проводится линия постоянного влагосодержания  $x_0 = x_1 = const$  до пересечения с изотермой  $t_1$  в точке  $B$ . Температура  $t_1$  находится из таблиц как предельная для данного материала температура сушильного агента. Из точки  $B$  проводится линия постоянной энтальпии  $I_1 = const$  (линия теоретического процесса) до пересечения с изотермой  $t_2$ , соответствующей температуре воздуха на выходе из сушилки (точка  $C'$ ). Влагосодержание для этой точки –  $x_2'$ . На рисунке 6.3  $BC'$  – линия теоретического процесса сушки.



а – интервал температур от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $200^{\circ}\text{C}$ ; б – интервал температур от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $500^{\circ}\text{C}$

Рисунок 6.2 –  $I$ - $x$  диаграмма Рамзина



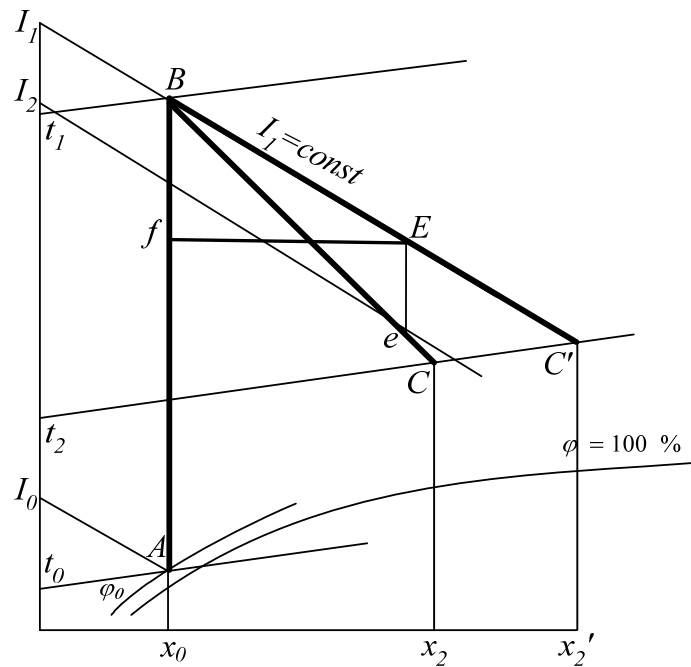


Рисунок 6.3 – Построение теоретического и действительного процесса сушки на  $I$ - $x$  диаграмме

### 6.2.3 Определение тепловых потерь

Удельные тепловые потери на нагревание материала  $q_M$ , Дж/кг, равны

$$q_M = \frac{G_K c (t_K - t_H)}{W}$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К).

Величина  $c$ , Дж/(кг·К), определяется с учетом влажности материала на выходе из сушилки по формуле:

$$c = c_w \frac{w_K}{100} + c_{cm} \frac{100 - w_K}{100},$$

где  $c_w$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

$c_{cm}$  – удельная теплоемкость абсолютно сухого материала, Дж/(кг·К);

$t_K$  – максимальная температура нагрева материала, °С; берется из таблицы 6.1.

Величина удельных тепловых потерь в окружающую среду принимается в размере (4-6) % от тепла, затрачиваемого в теоретической сушилке  $q_{ном}$ , Дж/кг:

$$q_{nom} = (0,04 - 0,06)q_T,$$

где  $q_T$  – удельный расход тепла в теоретической сушилке, Дж/кг.

Удельный расход тепла в теоретической сушилке  $q_T$ , Дж/кг, определяется по формуле:

$$q_T = \frac{I_1 - I_0}{x_2' - x_0},$$

где  $I_0, I_1$  – энтальпия воздуха в точках  $A$  и  $B$ , Дж/кг;

$x_0, x_2'$  – влагосодержание воздуха в точках  $A$  и  $C'$ , кг/кг.

#### 6.2.4 Построение действительного процесса на $I$ - $x$ диаграмме

Вычисляется степень покрытия тепловых потерь  $\Delta$ , Дж/кг:

$$\Delta = t_H c_e - (q_M + q_{nom}).$$

Определяется соотношение масштабов диаграммы

$$m = \frac{M_i}{M_x},$$

где  $M_i$  – число единиц энтальпии в 1 мм диаграммы, Дж/кг;

$M_x$  – число единиц влагосодержания в 1 мм диаграммы, кг/кг.

На линии  $BC'$  теоретического процесса берется произвольная точка  $E$ , измеряется расстояние  $Ef$  до линии  $AB$  в миллиметрах и вычисляется отрезок  $Ee$  по формуле:

$$Ee = Ef \frac{\Delta}{m}.$$

В зависимости от знака  $\Delta$  отрезок  $Ee$  может получиться отрицательным или положительным. Если  $\Delta < 0$ , то отрезок откладывается вниз от точки  $E$ , если  $\Delta > 0$  – вверх. Через точки  $B$  и  $e$  проводится линия действительного процесса до пересечения с изотермой  $t_2$  в точке  $C$ . По точке  $C$  находятся параметры  $x_2, I_2$  отработанного воздуха. На рисунке 6.3  $BC$  – линия действительного процесса сушки.

## 6.2.5 Определение расходов воздуха и тепла

Расход воздуха на сушку  $L$ , кг/с равен:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}.$$

Расход тепла на сушку  $Q_{КАЛ}$ , Дж, определяется из теплового баланса:

$$Q_{МН} + Q_{ВН} + Q_{КАЛ} = Q_{МК} + Q_{ВК} + Q_{ПОТ},$$

где  $Q_{МН}$  – тепло, поступающее с влажным материалом,  $Q_{МН} = G_H c_H t_H$ ;

$Q_{ВН}$  – тепло, поступающее с воздухом в сушилку,  $Q_{ВН} = L I_0$ ;

$Q_{МК}$  – тепло, уходящее с высушенным материалом,  $Q_{МК} = G_K c_K t_K$ ;

$Q_{ВК}$  – тепло, уходящее с воздухом из сушилки,  $Q_{ВК} = L I_2$ ;

$Q_{ПОТ}$  – потери тепла в окружающую среду,  $Q_{ПОТ} = q_{ном} W$ .

Результаты теплового расчета привести в виде таблицы теплового баланса 6.4.

## 6.2.6 Определение основных размеров барабана

Диаметр барабана вычисляется по формуле:

$$D_{\sigma} = \sqrt{\frac{4V_{\sigma}}{\pi v_{\sigma}}},$$

где  $V_{\sigma}$  – объемный расход воздуха на выходе из сушилки, м<sup>3</sup>/с;

$$V_{\sigma} = L v_0,$$

$v_0$  – удельный объем воздуха на выходе из сушилки, м<sup>3</sup>/кг принимается из таблицы 6.5;

$v_{\sigma}$  – допустимая скорость на выходе из сушилки, м/с; принимается для точки **C** из таблицы 6.1.

Для окончательного выбора диаметра барабана рекомендуется пользоваться нормами Главхиммаша, приведенными в таблице 6.6.

Длина барабана  $L_{\sigma}$ , м:

$$L_{\sigma} = \frac{V_{\sigma}}{F},$$

$$V_{\delta} = \frac{3600W}{A},$$

где  $V_{\delta}$  – объем барабана, м<sup>3</sup>;

$A$  – напряжение объема барабана по влаге, (кг·м<sup>3</sup>)/ч, принимается из таблицы 6.1 в зависимости от свойств высушиваемого материала;

$F$  – площадь сечения барабана, м<sup>2</sup>.

По нормам отношение  $L_{\delta}/D_{\delta}$  должно находиться в пределах 3,5-7,0.

Уточняется скорость воздуха

$$v_{\delta}' = \frac{V_{\delta}}{F}.$$

Скорость воздуха не должна превышать максимальную величину, указанную в таблице 6.1.

### 6.2.7 Определение продолжительности сушки

Продолжительность сушки  $\tau$ , с, определяется по следующей формуле:

$$\tau = \frac{V_{\delta} \rho \beta}{G_{cp}},$$

где  $V_{\delta}$  – объем барабана, м<sup>3</sup>;

$\rho$  – средняя насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup> (см. таблицу 6.1);

$\beta$  – степень заполнения барабана (см. таблицу 6.1);

$G_{cp}$  – средняя масса материала проходящего через барабан, кг/с

$$G_{cp} = \frac{G_H + G_K}{2}.$$

### 6.2.8 Определение числа оборотов барабана

Число оборотов барабана  $n$ , об/мин, определяется по следующей формуле:

$$n = \frac{60L_{\delta}}{a \tau D_{\delta} \operatorname{tg} \alpha},$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от диаметра и конструкции барабана; для распределительной насадки величина берется из таблицы 6.6;

$\alpha$  – угол наклона барабана, принимается равным (2-6) град.

Таблица 6.1- Исходные данные для расчета сушиллки

Исходные данные	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Материал	<i>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>					Поваренная соль <i>NaCl</i>				
Место установки	Смоленск					Челябинск				
Производительность по начальному материалу $G_H$ , кг/с	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
Начальная влажность материала $w_H$ , %	25	23	20	20	18	14	14	13	13	12
Конечная влажность материала $w_K$ , %	1	1	1	1,5	1,5	0,9	0,8	0,8	0,7	0,7
Температура поступающего материала $t_H$ , °C	16	18	20	21	22	19	20	21	20	21
Пределная температура нагрева материала $t_K$ , °C	100	100	100	100	100	70	80	90	100	70
Пределная температура сушильного агента $t_l$ , °C	450	500	450	500	400	150	200	150	200	400
Температура сушильного агента на выходе из сушиллки $t_2$ , °C	60	60	60	65	65	45	45	45	45	45
Напряжение барабана по влаге $A$ , кг/(м <sup>3</sup> ·ч)	8	9	10	11	12	7	8	7	9	15
Допускаемая скорость агента на выходе из сушиллки $v_g$ , м/с	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Удельная теплоемкость абсолютно сухого материала $c_{сух}$ , Дж/(кг·К)	950	950	950	950	950	900	900	900	900	900
Насыпная плотность материала $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	800	800	800	800	800	750	750	750	750	750
Коэффициент заполнения барабана $\beta$	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14

Таблица 6.2 – Материальный баланс

Приход			Расход		
Статьи прихода	Кол-во, кг/с	%	Статьи расхода	Кол-во, кг/с	%
1 Влажный материал, $G_H$	.....	....	1 Высушенный материал, $G_K$	.....	....
			2 Удаляемая влага, $W$	.....	....
Итого	.....	100	Итого	.....	100

Таблица 6.3 – Средняя температура и относительная влажность атмосферного воздуха в различных районах СНГ

Наименование пункта	Январь		Июль	
	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\varphi_0, \%$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$\varphi_0, \%$
Алма-Ата	-8,6	87	22,1	56
Астрахань	-7,1	91	23,2	58
Ашхабад	-0,4	84	29,6	41
Баку	3,4	82	23,3	65
Батуми	6,3	78	23,1	84
Брянск	-8,8	88	18,2	74
Владивосток	-13,7	74	20,6	77
Ворошиловград	-7,0	84	22,2	69
Владимир	-11,7	84	18,3	69
Вологда	-12,0	85	17,0	70
Воронеж	-9,8	90	20,0	62
Волгоград	-9,9	85	20,7	50
Горький	-12,2	89	19,4	68
Грозный	-4,9	88	23,9	70
Днепропетровск	-6,0	88	22,3	60
Ереван	-5,8	89	25,0	50
Иваново	-12,0	90	18,8	71
Казань	-13,6	86	19,9	63
Калуга	-9,7	89	18,4	68
Керчь	1,3	88	23,4	68
Киев	-6,0	89	19,3	69
Кишинев	-4,3	88	21,6	62
Краснодар	-2,1	90	23,7	67
Курск	-9,3	88	19,4	67
Львов	-4,0	87	18,1	74
Минск	-6,8	88	17,5	78
Николаев	-4,0	88	23,1	68
Одесса	-3,1	88	22,6	61
Орел	-9,6	92	18,6	77
Ростов-на-Дону	-6,1	89	23,7	59
Саратов	-11,3	84	23,1	53
Екатеринбург	-16,2	84	17,2	70
Смоленск	-8,4	88	17,6	78
Тамбов	-11,1	88	20,0	68
Ташкент	-1,3	81	25,8	46
Тбилиси	-1,0	80	24,6	51
Харьков	-7,7	88	20,6	65
Херсон	-3,4	89	23,3	62
Челябинск	-16,2	84	18,6	72

Таблица 6.4 – Тепловой баланс

Приход			Расход		
Статьи прихода	Кол-во, Вт	%	Статьи расхода	Кол-во, Вт	%
1 С влажным материалом, $Q_{МН}$	.....	....	1 С высушенным материалом, $Q_{МК}$	....	....
2 С воздухом, $Q_{ВН}$	.....	....	2 С воздухом, $Q_{ВК}$	.....	....
3 Тепло калорифера, $Q_{КАЛ}$	.....	....	3 Потери тепла в окружающую среду, $Q_{ПОТ}$	.....	....
Итого		100	Итого		100

Таблица 6.5 – Объем влажного воздуха на 1 кг сухого воздуха  $v_0$ , м<sup>3</sup>/кг

$t, ^\circ\text{C}$	$\varphi, \%$							
	10	20	30	40	50	60	70	80
40	0,912	0,919	0,925	0,933	0,94	0,947	0,954	0,962
45	0,928	0,937	0,947	0,956	0,966	0,976	0,986	0,996
50	0,945	0,958	0,979	0,983	0,996	1,01	1,02	1,04
55	0,963	0,979	0,996	1,01	1,03	1,05	1,07	1,09
60	0,982	1,00	1,02	1,05	1,07	1,09	1,12	1,15
65	1,00	1,08	1,08	1,09	1,12	1,15	1,19	1,22
70	1,02	1,06	1,09	1,13	1,17	1,22	1,27	1,32
75	1,05	1,09	1,14	1,25	1,31	1,38	1,31	1,46
80	1,07	1,13	1,19	1,26	1,34	1,43	1,63	1,65
85	1,10	1,17	1,26	1,36	1,46	1,59	1,75	1,94
90	1,13	1,22	1,33	1,47	1,63	1,83	2,08	2,42
95	1,16	1,28	1,43	1,62	1,86	2,19	2,65	3,35
100	1,20	1,35	1,55	1,81	2,17	2,72	3,63	5,45

Таблица 6.6 – Зависимость между диаметром и коэффициентом, зависящим от конструкции барабана

$D_0, \text{ м}$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,8
$a$	0,66	0,60	0,55	0,50	0,46	0,43	0,40	0,38	0,34

## 7 Рекомендуемая литература

### 7.1 Основная

7.1.1 Касаткин, Андрей Георгиевич. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин .— 13-е изд., стереотип. — М.: Альянс, 2006 .— 752 с.

7.1.2 Плановский, Александр Николаевич. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: учебник для вузов / А. Н. Плановский, П. Н. Николаев .— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Химия, 1987 .— 496 с

7.1.3 Гельперин, Нисон Ильич. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебное пособие для вузов : в 2 книгах / Н. И. Гельперин.— М.: Химия, 1981.

7.1.4 Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию: учебное пособие для вузов / Г. С. Борисов [и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского .— 5-е изд., стер. — М.: Альянс, 2010.

### 7.2 Дополнительная

7.2.1 Павлов, Константин Федорович. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова .— 10-е изд., перераб. и доп. — Л.: Химия, 1987 .— 576 с.

7.2.2 Машины и аппараты химических производств / И. И. Чернобыльский [и др.]; под ред. И. И. Чернобыльского .— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1975 .— 453, [3] с..

7.2.3 Флореа, О. Расчеты по процессам и аппаратам химической технологии: пер. с румынского / О. Флореа, О. Смигельский; под ред. С. З. Кагана; пер. З. М. Хаимского .— М.: Химия, 1971 .— 444 с.

7.2.4 Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию: учебное пособие для вузов / Г. С. Борисов [и др.]; под ред. Ю. И. Дытнерского .— 5-е изд., стер. — М.: Альянс, 2010 .— 493 с.

7.2.5 Шаповалов, Юрий Николаевич. Машины и аппараты общехимического назначения: учебное пособие для студентов - механиков / Ю. Н. Шаповалов, В. С. Шеин.— Воронеж : Изд-во Воронежского ун-та, 1981.— 304 с.

7.2.6 Берд Р. Явление переноса/ Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лаитфут.- М.: Химия, 1974.-688 с.

7.2.7 Коган, Владимир Борисович. Теоретические основы типовых процессов химической технологии: учебное пособие для вузов / В. Б. Ко-



ган.— Л. : Химия, 1977 .— 592 с..

7.2.8 Романков, Петр Григорьевич. Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина .— 3-е изд., перераб. — Л.: Химия, 1982 .— 288 с.

7.2.9 Черкасский, Владимир Михайлович. Насосы, вентиляторы, компрессоры: учебник для теплоэнергетических специальностей вузов / В. М. Черкасский.— М.: Энергоатомиздат, 1984 .— 416 с.

7.2.10 Жужиков В.А. Фильтрование/ В.А. Жужиков.- М.: Химия, 1968.-391 с.

7.2.11 Соколов В.И. Центрифугирование/ В.И. Соколов.- М.: Химия, 1976.- 408 с.

7.2.12 Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности/ З. Штербачек, П. Тауск. – Л.: Госхимиздат, 1963.-416 с.

7.2.13 Исаченко, Виктор Павлович. Теплопередача: учебник для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел .— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергия, 1972 .— 488 с.

7.2.14 Кафаров, Виктор Вячеславович. Основы массопередачи. Системы газ - жидкость, пар - жидкость, жидкость - жидкость.: учебное пособие для вузов / В. В. Кафаров; Под ред. Т. П. Федорова .— 2-е изд., перераб. — М.: Высшая школа, 1979 .— 496 с.

7.2.15 Рамм, Виталий Максимович. Абсорбция газов / В. М. Рамм.— М. : Химия, 1976 .— 768 с.

7.2.16 Александров И.А. Ректификационные и абсорбционные аппараты/ И.А. Александров. – М.: Химия, 1978. - 280 с.

7.2.17 Гельперин, Нисон Ильич. Структура потоков и эффективность колонных аппаратов химической промышленности / Н. И. Гельперин, В. Л. Пибалк, А. Е. Костянян .— М. : Химия, 1977 .— 264 с..

**Приложение А**  
(справочное)  
Физические свойства водных растворов

В таблице А.1 приведена плотность водных растворов некоторых веществ.

Таблица А.1 – Плотность жидких веществ и водных растворов

Вещество	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>							
	-20 <sup>0</sup> С	0 <sup>0</sup> С	20 <sup>0</sup> С	40 <sup>0</sup> С	60 <sup>0</sup> С	80 <sup>0</sup> С	100 <sup>0</sup> С	120 <sup>0</sup> С
Кальций хлористый (25 % - ный раствор)	817	801	785	768	752	735	718	700
Натр едкий, растворы:								
30 % - ный,	-	1340	1328	1316	1303	1289	1276	1261
20 % - ный,	-	1230	1219	1208	1196	1183	1170	1155
10 % - ный	-	1117	1109	1100	1089	1077	1064	1049
Натрий хлористый (20 % - ный раствор)	-	1157	1148	1139	1130	1120	1110	1100
Серная кислота (60 % - ная)	1532	1515	1498	1482	1466	1450	1434	1418
Уксусная кислота:								
100 % - ная,	-	1072	1048	1027	1004	981	958	922
50 % - ная	-	1074	1058	1042	1026	1010	994	978
Этиловый спирт:								
100 % - ный,	823	806	789	772	754	735	716	693
60 % - ный,	-	904	891	878	864	849	835	820
40 % - ный,	-	947	935	923	910	897	885	872
20 % - ный	-	977	969	957	946	934	922	910

В таблице А.2 приведены коэффициенты динамической вязкости водных растворов

Таблица А.2 – Вязкость водных растворов

Вещество	Вязкость $\mu$ , мПа с											
	-20 <sup>0</sup> С	-10 <sup>0</sup> С	0 <sup>0</sup> С	10 <sup>0</sup> С	20 <sup>0</sup> С	30 <sup>0</sup> С	40 <sup>0</sup> С	50 <sup>0</sup> С	60 <sup>0</sup> С	80 <sup>0</sup> С	100 <sup>0</sup> С	120 <sup>0</sup> С
Кальций хлористый (25 % - ный раствор)	10,6	7	4,47	3,36	2,74	2,25	1,85	1,55	-	-	-	-
Натр едкий, Растворы:												
20 % - ный,	-	-	-	-	4,48	3,3	2,48	2	1,63	1,27	1,15	1,08
10 % - ный	-	-	-	-	1,86	1,45	1,16	0,98	0,91	0,7	0,65	0,6
Натрий хлористый (20 % - ный раствор)	-	4,08	2,67	1,99	1,56	1,24	1,03	0,87	0,74	0,57	0,46	0,38
Серная кислота (60 % - ная)	20	15	10,5	7,7	5,52	4,08	3,42	2,8	2,4	1,5	1,07	0,9
Уксусная кислота:												
100 % - ная,	-	-	-	-	1,22	1,04	0,9	0,79	0,7	0,56	0,46	0,37
50 % - ная	-	-	4,35	3,03	2,21	1,7	1,35	1,11	0,92	0,65	0,5	0,4
Этиловый спирт:												
100 % - ный,	2,38	2,23	1,78	1,46	1,19	1,0	0,825	0,701	0,591	0,435	0,326	0,248
60 % - ный,	-	-	5,75	3,77	2,67	1,93	1,45	1,13	0,9	0,6	0,45	0,34
40 % - ный,	-	-	7,14	4,39	2,91	2,02	1,48	1,13	0,89	0,6	0,44	0,34
20 % - ный	-	-	5,32	3,17	2,18	1,55	1,16	0,91	0,74	0,51	0,38	0,3

В таблице А.3 приведена удельная теплоемкость водных растворов некоторых веществ.

Таблица А.3 – Удельная теплоемкость водных растворов

Вещество	Удельная теплоемкость $c$ , ккал/(кг·°С)							
	-20°С	0°С	20°С	40°С	60°С	80°С	100°С	120°С
Кальций хлористый (25 % - ный раствор)	0,678	0,69	0,702	0,71	0,73	0,74	0,75	0,76
Натр едкий, растворы:								
20 % - ный,	-	0,842	0,862	0,875	0,882	0,886	0,888	0,888
10 % - ный	-	0,882	0,9	0,912	0,918	0,922	0,924	0,926
Натрий хлористый (20 % - ный раствор)	-	0,941	0,939	0,936	0,931	0,93	0,92	0,92
Серная кислота:								
60 % - ная	0,505	0,525	0,545	0,565	0,585	0,605	0,625	0,645
Уксусная кислота:								
100 % - ная,	-	0,45	0,476	0,502	0,527	0,553	0,579	0,605
50 % - ная	-	0,73	0,74	0,75	0,76	0,78	0,79	0,8
Этиловый спирт:								
100 % - ный,	0,505	0,547	0,593	0,648	0,708	0,769	0,839	0,909
60 % - ный,	-	0,73	0,75	0,79	0,83	0,86	0,90	0,95
40 % - ный,	-	0,82	0,84	0,87	0,88	0,91	0,94	0,96
20 % - ный	-	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,97	0,98

Примечание – Коэффициент пересчета в систему СИ: ккал/(кг·°С)×4190 = Дж/(кг·К)

В таблице А.4 приведены коэффициенты теплопроводности водных растворов.

Таблица А.4 – Теплопроводность водных растворов

Вещество	Теплопроводность $\lambda$ , ккал/м·ч·°С							
	-20°С	0°С	20°С	40°С	60°С	80°С	100°С	120°С
Кальций хлористый (25 % - ный раствор)	0,407	0,435	0,464	0,492	0,52	0,548	0,58	0,6
Натр едкий, растворы:								
20 % - ный,	-	0,447	0,462	0,473	0,484	0,491	0,494	0,496
10 % - ный	-	0,45	0,467	0,48	0,492	0,499	0,503	0,505
Натрий хлористый (20 % - ный раствор)	-	0,468	0,497	0,52	0,54	0,555	0,565	0,57
Серная кислота (60 % - ная)	0,33	0,35	0,37	0,38	0,4	0,43	0,45	0,47
Уксусная кислота (50 % - ная)	-	0,27	0,298	0,326	0,355	0,383	0,41	0,44
Этиловый спирт:								
60 % - ный		0,215	0,274	0,27	0,298	0,326	0,35	0,38
40 % - ный	-	0,3	0,329	0,357	0,385	0,413	0,44	0,47
20 % - ный	-	0,384	0,412	0,44	0,467	0,495	0,52	0,55

Примечание - Коэффициент пересчета в систему СИ: ккал/м·ч·°С×1,16 = Вт(м·К)

В таблице А.5 приведены значения коэффициентов объемного расширения некоторых водных растворов.

Таблица А.5 – Коэффициент объемного расширения водных растворов

Вещество	$\beta \times 10^3, K^{-1}$							
	-20°С	0°С	20°С	40°С	60°С	80°С	100°С	120°С
Кальций хлористый (25 % - ный раствор)	0,35	0,35	0,39	0,43	0,46	0,49	0,51	0,55
Натр едкий, растворы:								
20 % - ный,	-	0,41	0,45	0,48	0,51	0,55	0,59	0,63
10 % - ный	-	0,34	0,4	0,46	0,51	0,57	0,63	0,69
Натрий хлористый (20 % - ный раствор)	-	0,36	0,41	0,46	0,5	0,54	0,58	0,62
Серная кислота (60 % - ная)	0,58	0,58	0,56	0,55	0,55	0,54	0,53	0,53
Уксусная кислота (50 % - ная)	-	1,05	1,07	1,11	1,14	1,18	1,23	1,3
Этиловый спирт	1,03	1,05	1,08	1,13	1,22	1,33	1,44	1,87

## Приложение Б (справочное)

### Свойства насыщенного водяного пара

В таблице Б.1 приведены свойства насыщенного водяного пара.

Таблица Б.1 – Свойства насыщенного водяного пара в зависимости от давления

Давление $p_{абс}$ , ат	Температура $t$ , °С	Удельный объем, м <sup>3</sup> /кг	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Удельная энтальпия жидкости $i_{конд}$ , кДж/кг	Удельная энтальпия пара $i_{п}$ , кДж/кг	Удельная теплота парообразования $r$ , кДж/кг
0,01	6,6	131,60	0,00760	27,7	2506	2478
0,015	12,7	89,64	0,01116	53,2	2518	2465
0,02	17,1	68,27	0,01465	71,6	2526	2455
0,025	20,7	55,28	0,01809	86,7	2533	2447
0,03	23,7	46,53	0,02149	99,3	2539	2440
0,04	28,6	35,46	0,02820	119,8	2548	2429
0,05	32,5	28,73	0,03481	136,2	2556	2420
0,06	35,8	24,19	0,04133	150,0	2562	2413
0,08	41,1	18,5	0,05420	172,2	2573	2400
0,10	45,5	14,96	0,06686	190,2	2581	2390
0,12	49,0	12,60	0,07937	205,3	2588	2382
0,15	53,6	10,22	0,09789	224,6	2596	2372
0,20	59,7	7,977	0,1283	250,1	2607	2358
0,30	68,7	5,331	0,1870	287,9	2620	2336
0,40	75,4	4,072	0,2456	315,9	2632	2320
0,50	80,9	3,304	0,3027	339,0	2642	2307
0,60	85,5	2,785	0,3590	358,2	2650	2296
0,70	89,3	2,411	0,4147	375,0	2657	2286
0,80	93,0	2,128	0,4699	389,7	2663	2278
0,90	96,2	1,906	0,5246	403,1	2668	2270
1,0	99,1	1,727	0,5790	415,2	2677	2264
1,2	104,2	1,457	0,6865	437,0	2686	2249
1,4	108,7	1,261	0,7931	456,3	2693	2237
1,6	112,7	1,113	0,898	473,1	2703	2227
1,8	116,3	0,997	1,003	483,6	2709	2217
2,0	119,6	0,903	1,107	502,4	2710	2208
3,0	132,9	0,618	1,618	558,9	2730	2171
4,0	142,9	0,4718	2,120	601,1	2744	2141
5,0	151,1	0,3825	2,614	637,7	2754	2117
6,0	158,1	0,3222	3,104	667,9	2768	2095
7,0	164,2	0,2785	3,591	694,3	2769	2075
8,0	169,6	0,2454	4,075	718,4	2776	2057

**Приложение В**  
(справочное)  
Физические свойства воды

В таблице В.1 приведены физические свойства воды.

Таблица В.1 – Физические свойства воды на линии насыщения

$t$	$p$	$\rho$	$c \cdot 10^{-3}$	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^7$	$\mu \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^4$	$\sigma \cdot 10^3$	Pr
0	1	1000	4,23	55,1	1,31	1790	-0.63	75,6	13,7
10	1	1000	4,19	57,5	1,37	1310	0.70	76,2	9,52
20	1	998	4,19	59,9	1,43	1000	1.82	72,7	7,02
30	1	996	4,18	61,8	1,49	804	3.21	71,2	5,42
40	1	992	4,18	63,4	1,53	657	3.87	69,7	4,31
50	1	988	4,18	64,8	1,57	549	4.49	67,7	3,54
60	1	983	4,18	65,9	1,61	470	5.11	66,2	2,98
70	1	978	4,19	66,8	1,63	406	5.70	64,3	2,55
80	1	972	4,19	67,5	1,66	355	6.32	62,6	2,21
90	1	965	4,19	68,0	1,68	315	6.95	60,7	1,95
100	1,03	958	4,23	68,3	1,69	282	7,50	58,9	1,75
110	1,46	951	4,23	68,5	1,69	256	8,00	56,9	1,58
120	2,02	943	4,23	68,6	1,72	231	8,60	54,9	1,43
130	2,75	935	4,27	68,6	1,72	212	9,20	52,9	1,32
140	3,68	926	4,27	68,5	1,72	196	9,70	50,7	1,23
150	4,85	917	4,32	68,4	1,72	185	10,3	48,7	1,17
160	6,3	907	4,36	68,3	1,72	174	10,8	46,6	1,10
170	8,08	897	4,40	67,9	1,72	163	11,5	44,4	1,05
180	10,23	887	4,44	67,5	1,72	153	12,2	42,4	1,01

Примечания:

$t$  – температура, °С;

$p$  – давление, кгс/см<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$a$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с;

$\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;

$\beta$  – коэффициент объемного расширения, К<sup>-1</sup>;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

Pr – критерий Прандтля.

**Приложение Г**  
(справочное)

Коэффициенты теплопроводности материалов

В таблице Г.1 приведены коэффициенты теплопроводности некоторых материалов.

Таблица Г.1 – Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Наименование материала	$\lambda$ , Вт/(м·К)
Алюминий	200
Асбест	0,116
Асбозурит	0,178
Латунь	85
Медь	380
Накипь котельная	1,4-3,1
Ньювелъ	0,093
Свинец	35
Совелит	0,10
Сталь, чугун	45
Сталь нержавеющая	17
Стекло	0,75
Шлаковая вата	0,07



Людмила Федоровна Зарипова

**ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ ХИМИЧЕСКОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ**

Учебное пособие

Редактор М. В. Ворожейкина

Технический редактор Е. Н. Клименкова

Подписано к печати \_\_\_\_\_ Формат бумаги 60 × 84/32.  
Гарнитура Times New Roman. Бумага писчая № 2.  
Плоская печать. Усл. печ. л. 1,62 Уч.-изд. л. 2,94  
Тираж 20 экз. Заказ \_\_\_\_\_

Отпечатано в ИПО СТИ НИЯУ МИФИ  
636070 г. Северск Томской обл.,  
пр. Коммунистический, 65.