

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ А.А. ЕЖЕВСКОГО»

Э.А. ТАИРОВ

**ТЕПЛОМАССООБМЕННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Методические указания и контрольные задания
для студентов высших аграрных учебных заведений,
обучающихся по направлениям подготовки
140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»
и 110800 «Агроинженерия»

Иркутск 2015

Рецензент:

доцент кафедры теплоэнергетики
Института энергетики Национального исследовательского
Иркутского государственного технического университета,
кандидат технических наук, доцент
Бочкарев В.А.

Таиров Э.А.

Тепломассообменное оборудование предприятий: метод. указания и задания к выполнению контрольных работ студентов вузов / Э.А. Таиров. – Иркутск: Изд-во ИрГАУ им. А.А. Ежевского, 2015. – 40 с.

Методические указания предназначены для самостоятельного изучения дисциплины «Тепломассообменное оборудование предприятий» с выполнением контрольной работы. Содержат основные положения рабочей программы, задачи, упражнения и вопросы для самопроверки. Основной целью издания является оказание помощи при самостоятельном изучении курса, а также при решении инженерных задач, выполнении контрольных и расчетно-графических работ.

Для студентов по направлениям подготовки 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника», 110800 «Агроинженерия».

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Иркутской государственной сельскохозяйственной академии.

© Э.А. Таиров, 2015.

© Издательство ИрГАУ им. А.А. Ежевского

ВВЕДЕНИЕ

Курс «Тепломассообменное оборудование предприятий» является базовым при подготовке инженеров-теплоэнергетиков. Цель изучения дисциплины – подготовка студентов к владению вопросами конструктивных особенностей и расчета теплообменных и массообменных аппаратов, применяемых в различных областях промышленности, а также к использованию полученных знаний и навыков на стадии курсового и дипломного проектирования и в профессиональной деятельности.

Задача изучения данной дисциплины – усвоение принципов работы тепломассообменного оборудования промышленных предприятий; приобретение умений и навыков в проведении анализа материальных и тепловых балансов установок различного назначения, использовании диаграмм равновесия на примере бинарных смесей; овладение основами расчетов тепломассообменных аппаратов и установок. Для изучения дисциплин необходимо знание высшей математики, физики и гидродинамики.

В список рекомендуемой литературы включен основной комплект книг, в которых объем и структура материала в наибольшей степени согласуется с утвержденной программой дисциплины, а приведенные в приложениях справочные данные достаточны, чтобы в полном объеме выполнить расчеты, предусмотренные контрольными заданиями.

Большое внимание студенту нужно обратить на самостоятельную работу с учебной литературой. Настоящее издание преследует цель – обеспечить единство процессов самостоятельной проработки текста рекомендуемого учебника и самоконтроля за качеством усвоения программного материала дисциплины в форме ответов на вопросы и решения контрольных заданий.

Тема 1

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Программа

Основные виды и классификация теплообменного оборудования по принципу действия и технологическому назначению. Теплоносители, их свойства и характеристики. Рекуперативные теплообменники. Основные конструкции: кожухотрубные, секционные, с оребренными трубами, пластинчатые, спиральные. Виды расчета теплообменников: тепловой конструкторский или поверочный, гидравлический, прочностной, технико-экономический. Методы интенсификации теплообмена. Расчет теплообменников с фазовыми переходами. Регенеративные теплообменники. Конструкции и принцип действия теплообменников с подвижной и неподвижной насадкой. Изменение температур в насадке. Смесительные теплообменники, области применения и конструкции. Испарители и конденсаторы смесительного типа. Оросительные камеры кондиционеров. Градирни. Деаэраторы. Расчет смесительных теплообменников.

Литература [1], [2, гл. 6, 7], [3].

Методические указания

С точки зрения методов теплового расчета выделяют три типа теплообменников – рекуперативные (поверхностные), смесительные и регенеративные. Необходимо обратить внимание на составление уравнений материального и теплового балансов, лежащих в основе теплового расчета теплообменников. Расчет рекуперативного теплообменника дополняется уравнением теплопередачи и введением понятия среднего температурного напора. Режим работы регенеративного теплообменника является сугубо нестационарным и периодическим, поэтому здесь возможен приближенный расчет с использованием осредненных за время нагрева (охлаждения) насадки температур теплоносителей и твердой насадки.

Для расчета непосредственно теплообмена необходимо знание законов теплопроводности Фурье, конвективной теплоотдачи Ньютона и лучистого теплообмена Больцмана. Рассмотрение видов теплоносителей увязывается с условиями их применения, в частности, по рабочим температурам в теплообменнике. В поверхностных теплообменниках с фазовым превращением теплоносителя (испарители, конденсаторы, подогреватели), при наличии выделенных зон одно-

фазного и двухфазного течения, расчет каждой зоны проводится раздельно.

Вопросы для самопроверки

- 1.1 К какому типу теплообменников относится конденсатор турбины на тепловой электростанции?
- 1.2 К какому типу теплообменников относится деаэратор?
- 1.3 С помощью какого уравнения определяют площадь теплообменной поверхности в теплообменнике?
- 1.4 В каком случае уравнение теплового баланса в теплообменнике, записанное с использованием температуры теплоносителя, оказывается неприменимым?
- 1.5 При какой схеме течения теплоносителей в рекуперативном теплообменнике выходная температура нагреваемой среды может оказаться выше выходной температуры греющей среды?
- 1.6 Какие элементы кожухотрубного теплообменника используются для крепления трубного пучка?
- 1.7 Какое предназначение имеют внутренние элементы в смешительных теплообменниках?
- 1.8 Из каких временных стадий состоит один период работы регенеративного теплообменника?
- 1.9 Что собой представляет среднелогарифмический температурный напор в теплообменнике?
- 1.10 Для чего используют оребрение труб в теплообменнике?

Т е м а 2 **ВЫПАРНЫЕ УСТАНОВКИ**

Программа

Испарительные, опреснительные выпарные установки. Принцип действия, основные конструкции аппаратов. Тепловые схемы и установки. Физико-химические и термодинамические основы процессов выпаривания. Свойства растворов. Основы теплового расчета.

Литература: [2, гл.9], [3]

Методические указания

Основным назначением выпарной установки является повышение концентрации жидкого раствора удалением из него части раство-

рителя путем кипячения или испарения последнего. Поэтому при изучении выпарных установок следует обратить внимание на компоновку основных частей – греющей камеры (встроенной и вынесенной), циркуляционной трубы, сепарационной зоны и, при использовании принудительной циркуляции, насоса.

Главным процессом является испарение растворителя, чаще всего воды, путем подвода внешнего тепла. Поэтому в основе расчета выпарной установки лежит тепловой расчет. Нужно обратить внимание на то, что свойства раствора определяются видом и концентрацией растворенного вещества, а процесс выпаривания может производиться под давлением, как выше, так и ниже атмосферного.

В связи с тем, что в большинстве случаев источником внешнего тепла служит греющий пар стороннего источника, необходимо рассмотреть такие меры по уменьшению его расхода как использование многокорпусных установок, схемы с полным и частичным тепловым насосом, утилизации вторичного тепла.

Вопросы для самопроверки.

- 2.1 Какой процесс называется выпариванием?
- 2.2 Для чего служит греющая камера?
- 2.3 Как осуществляется движение раствора в аппарате с естественной циркуляцией?
- 2.4 Что называется температурной депрессией для данного раствора?
- 2.5 Чем обусловлено явление самоиспарения раствора?
- 2.6 Какая связь существует между выпариванием и кристаллизацией?
- 2.7 В каких случаях используется барометрический конденсатор после выпарного аппарата?
- 2.8 Для чего служит барометрическая труба в конденсаторе (п. 2.7)?
- 2.9 Что называют концентрацией упаренного раствора?
- 2.10 Каким образом установка теплового насоса ведет к экономии греющего пара?

Тема 3

КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ

Программа

Кристаллизационные установки. Принцип действия, основные конструкции аппаратов. Тепловые схемы и установки. Физико-химические и термодинамические основы процессов кристаллизации.

Литература: [2, гл.16]

Методические указания

Из многообразия форм и методов кристаллизации по конечному результату следует выделить два вида – отверждение расплавов и фракционную кристаллизацию бинарных и многокомпонентных смесей. Нужно обратить внимание на разные значения скоростей образования и роста кристаллов при переохлаждении расплава, которые влияют на структуру кристаллической фазы получаемого продукта.

Изучение фракционной кристаллизации нужно начать с рассмотрения диаграммы фазового равновесия бинарных смесей с линиями температур ликвидуса и солидуса. По диаграмме следует определять выход кристаллической фракции и содержание в ней высокоплавкого и низкоплавкого компонентов в зависимости от температуры процесса равновесной кристаллизации.

При рассмотрении аппаратных схем кристаллизации рекомендуется обратить внимание на основные – отверждение в формах; отверждение в тонком слое; схема кристаллизатора с циркуляцией осветленного маточника; схема непрерывной контактной кристаллизации с использованием жидкого хладагента. Для выделения растворенных кристаллических веществ из различных водных растворов используют выпарные аппараты с выносной греющей камерой и вакуум-кристаллизаторы с естественным контуром циркуляции.

Вопросы для самопроверки

- 3.1 Какую межфазную границу представляет линия ликвидуса?
- 3.2 Что называют температурой солидуса?
- 3.3 Как влияет концентрация тугоплавкого компонента в бинарной смеси на значение температуры солидуса?
- 3.4 В чем состоит различие между кристаллическими и аморфными твердыми телами?
- 3.5 Какой раствор называют пересыщенным?

3.6 К чему ведет превышение скорости роста кристаллов над скоростью их образования в расплаве?

3.7 В чем различие между фракционной кристаллизацией и отверждением расплавов?

3.8 Как называют жидкость, циркулирующую в кристаллизаторе, где происходит образование и рост кристаллов?

3.9 Допускается ли в кристаллизаторе прямой контакт хладагента с кристаллизующейся смесью?

3.10 Для чего используется многократная кристаллизация?

Тема 4

ДИСТИЛЛЯЦИЯ И РЕКТИФИКАЦИЯ

Программа

Дистилляционные и ректификационные установки. Конструкция и принцип действия установок. Физико-химические и термодинамические основы процессов дистилляции и ректификации. Виды смесей жидких компонентов. Идеальные смеси. Закон Рауля. Фазовые диаграммы состояния смесей жидкостей. Материальные и тепловые потоки в установках. Флегмовое число. Рабочие линии ректификационной колонны. Определение числа тарелок в колонне.

Литература: [2, гл.12]

Методические указания

Прежде всего, следует обратить внимание на принципиальное отличие ректификации как процесса с встречным движением паровой и жидкой фаз в колонне от простой дистилляции как не противоточного процесса. В основе обоих процессов используется разная склонность низкокипящих и высококипящих компонентов исходной смеси к переходу из жидкой фазы в паровую и обратно. Для понимания процессов нужно иметь представление о равновесных состояниях на примере идеальной бинарной смеси и отображении различных состояний бинарной смеси на изобарных диаграммах. Важно отметить, что область двухфазного (пар-жидкость) состояния смеси занимает определенный температурный диапазон. Каждому значению температуры внутри этого диапазона соответствует свой равновесный состав компонентов в паровой и жидкой фазах. Рассмотрите схемы постепенной и непрерывной однократной дистилляции и отображение

процесса дистилляции на диаграмме состояния бинарной смеси.

Изучение ректификации необходимо начать с рассмотрения принципиальной схемы непрерывно действующей установки для разделения бинарной смеси и элементов ректификационной колонны. Для анализа работы колонны необходимо овладеть уравнениями материального баланса по полным потокам масс и потокам низкокипящего компонента смеси с последующим выводом и графическим построением уравнений рабочих линий для укрепляющей и отгонной частей колонны. Важная роль отводится выбору значения флегмового числа, влияющему на достижение заданных параметров разделения смеси и количество теоретически требуемых ступеней разделения (тарелок) для укрепляющей и отгонной частей ректификационной колонны.

Вопросы для самопроверки

4.1 В чем принципиальное отличие между дистилляцией и ректификацией?

4.2 Какое физическое свойство компонентов смеси лежит в основе процессов дистилляции и ректификации?

4.3 Какое вещество называют дистиллятом?

4.4 Какую жидкость называют кубовым остатком?

4.5 Где в ректификационной колонне располагается тарелка питания?

4.6 В какую сторону будет изменяться содержание низкокипящего компонента в паровой фазе при повышении общей температуры двухфазной смеси?

4.7 Какую жидкость в колонне называют флегмой?

4.8 Что собою представляет флегмовое число?

4.9 Какую часть ректификационной колонны называют укрепляющей частью?

4.10 Связь между какими величинами по высоте колонны представлена в уравнении рабочей линии?

Тема 5 АБСОРБЦИЯ И АДСОРБЦИЯ

Программа

Абсорбционные и адсорбционные установки. Физическая сущность процессов абсорбции и адсорбции. Изотермы абсорбции и адсорбции. Принципиальные схемы установок. Материальный и тепловой баланс абсорбера.

Литература: [2, гл.11,14]

Методические указания

Следует обратить внимание на большой круг технологических задач, в решении которых применяются методы абсорбции и адсорбции, и требования к сорбентам. Наглядному графическому анализу процессов сорбции и десорбции существенную помощь оказывает диаграмма относительных концентрации поглощаемого компонента с нанесенной на ней кривой равновесных состояний двухфазной системы. При рассмотрении принципиальных схем установок нужно усвоить основные приемы создания больших поверхностей массообмена с целью интенсификации поглощения целевого компонента сорбентом. Важную роль в организации процессов сорбции газообразного или жидкого компонента играют противоточный характер движения фаз в аппаратах и разделение последних на отдельные секции. Для раздельного рассмотрения прохождения отдельных стадий в сорбенте (адсорбция, десорбция, регенерация) рекомендуется рассмотреть действие адсорбера с неподвижным слоем сорбента. Для установления взаимосвязи изменения концентраций и расходов в аппарате используются уравнения материальных балансов по поглощаемому компоненту и общим потокам масс.

Вопросы для самопроверки

- 5.1 Что называется абсорбцией?
- 5.2 В чем состоит принцип работы насадочного абсорбера?
- 5.3 Какую линию на диаграмме фазового равновесия называют изотермой абсорбции?
- 5.4 Для какого из процессов – абсорбции или десорбции, предпочтительна более низкая температура в изобарных условиях?
- 5.5 В чем основное различие процессов абсорбции и адсорбции?

- 5.6 Какова роль внутренних пор у адсорбентов?
- 5.7 С какой целью применяют секционирование противоточных адсорберов?
- 5.8 Что понимают под статической емкостью сорбента?
- 5.9 Какую задачу позволяет решить проведение адсорбции с неподвижным слоем сорбента?
- 5.10 Какие наиболее распространенные промышленные адсорбенты можете назвать?

Т е м а 6

СУШКА ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Программа

Сушильные установки. Понятия о процессах сушки, формы связи влаги с материалом. Сушильные агенты. Основы кинетики и динамики сушки. Первый и второй периоды сушки материалов. Методы расчета времени сушки в первом и втором периодах. Тепловой баланс конвективной сушильной установки. $h-d$ диаграмма влажного воздуха. Построение процесса сушки в $h-d$ диаграмме влажного газа.

Литература: [2, гл.15]

Методические указания

В большом многообразии способов ведения сушки твердых влажных материалов следует выделять конвективные и специальные методы сушки. Для выбора метода сушки и конструкции сушилки определяющее значение имеют физико-химические свойства высушиваемого материала (устойчивость к повышенным температурам, способность к сохранению товарных свойств при контакте с кислородом воздуха, способ удержания влаги и др.), его форма (полотно, нити, суспензии, фрагментированный материал) и размеры частиц (крупные детали, зерна, микрочастицы). Рассмотрите организацию сушки в камерных, туннельных, ленточных, барабанных, аэрофонтанных, пневмотранспортных сушилках, сушилках с псевдоожиженным слоем, а также работу специальных контактных, терморadiационных, сублимационных и высокочастотных сушилок. Нужно отличать наличие свободной и связанной влаги в высушиваемом твердом материале, обусловивших выделение двух периодов сушки. Для количественного анализа процесса сушки горячим воздухом необходи-

мо изучить основные свойства и $h-d$ диаграмму влажного воздуха, а также свойства влажного твердого материала. Проведите с помощью $h-d$ диаграммы анализ основных процессов во влажном воздухе (нагревание, охлаждение, изоэнтальпийное увлажнение, смешение воздуха разных параметров, выпадение конденсата).

Вопросы для самопроверки

- 6.1 Какие методы сушки относят к специальным?
- 6.2 Какой вид влаги удаляется в первом периоде сушки влажного твердого материала?
- 6.3 Как ведет себя скорость удаления влаги из влажного твердого материала во втором периоде сушки?
- 6.4 Какие преимущества многоленточных конвективных сушилок перед одноленточными?
- 6.5 В чем состоит принцип работы сушилки с псевдооживленным слоем?
- 6.6 В чем состоит определение движущей силы сушки?
- 6.7 Какое физическое явление лежит в основе сушки токами высокой частоты?
- 6.8 Как понимают процесс адиабатного испарения влаги?
- 6.9 Что называют относительной влажностью воздуха?
- 6.10 В каких пределах может изменяться влагосодержание воздуха?

Контрольные задания и упражнения к темам 1-2

1. Сухой насыщенный пар с давлением $6,18 \cdot 10^5$ Па конденсируется в теплообменнике на трубах, внутри которых движется вода, нагреваемая от 20 до 70°C . Определить среднелогарифмический и среднеарифметический температурные напоры.

2. Требуется охладить жидкость от 120 до 50°C , для чего используется вода с температурой 10°C . Конечная температура воды 24°C . Определить необходимую поверхность охлаждения при прямо-токе и противотоке, если коэффициент теплопередачи $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и передаваемый тепловой поток 14 кВт .

3. В вертикальном пароводяном теплообменнике охлаждающая вода, протекающая по трубам, должна отводить 360 кВт тепла. Сухой насыщенный пар под давлением $1,5 \text{ МПа}$ конденсируется на наружной поверхности труб. Определить необходимый температурный напор, если теплообменник выполнен из 60 труб наружным диаметром 22 мм и высотой $1,6 \text{ м}$.

Указания к решению

Здесь удобно использовать простую зависимость между величиной температурного напора (разность температур конденсирующего пара и наружной поверхности трубы) и плотности теплового потока:

$$t_s - t_{\text{сн}} = \left(\frac{d_{\text{н}}^{0,25}}{M} \right)^{1,33} \cdot q^{1,33},$$

где комплекс M , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^{1,75} \cdot \text{К}^{0,75}}$, может быть вычислен по формуле

$$M = 1,34(5700 + 56 \cdot t_s - 0,09t_s^2).$$

4. Трубчатый теплообменник имеет поверхность теплообмена 48 м^2 . В нем нагреваются $85,5 \text{ т/ч}$ воды от 77 до 95°C . Греющей средой является насыщенный водяной пар при избыточном давлении $0,43 \cdot 10^5$ Па. Найти коэффициент теплопередачи.

5. Через выпарную установку за сутки проходит 150 т продукта (барды). Определить количество воды, которое следует выпарить для того, чтобы повысить концентрацию раствора с 6 до 15% , а также вы-

ход упаренного продукта (барды).

6. На выпаривание подается $S_0 = 80$ т/ч раствора $NaOH$ с начальной концентрацией $a_0 = 0,14$ кг/кг раствора (14% масс.). Определить количество удаляемой воды W , если требуется получить на выходе из корпуса упаренный раствор с концентрацией $a_1 = 0,175$ кг/кг (17,5% масс.).

7. Определить температуру кипения раствора $NaOH$ с концентрацией $a = 0,175$ кг/кг раствора (17,5% масс.) и его температурную депрессию при давлении $P = 0,5$ МПа.

8. Электролитическая щелочь содержит в растворе 17,5% масс. $NaOH$ и 25% масс. $NaCl$. Определить температуру кипения раствора при $P = 0,5$ МПа.

Если в растворе содержатся несколько нелетучих веществ, то общая температурная депрессия равна сумме депрессий,

9. Определить расход пара в выпарном аппарате при поступлении $S_0 = 2,5$ т/ч раствора $NaOH$. Начальная концентрация раствора $a_0 = 10\%$ масс, конечная $a_1 = 30\%$. Температура греющего пара $t_{гп} = 140^\circ C$, температура отводимого конденсата $t_k = 140^\circ C$. Теплопотери аппарата $Q_{п} = 55000$ Вт. Раствор поступает в аппарат при температуре насыщения, давление в аппарате $P = 0,18$ МПа.

10. Определить поверхность нагрева рекуперативного теплообменника при прямоточном и противоточном движении теплоносителей. Теплоносителем является газ с начальной температурой $600^\circ C$ и конечной $300^\circ C$. Необходимо нагреть 40000 м³/ч воздуха (объем при нормальных физических условиях) от 30 до $250^\circ C$. Принять коэффициент теплопередачи 20 Вт/(м²·К), теплоемкость воздуха постоянная.

Задачи к темам 1-2

Задача 1. В противоточном теплообменнике охлаждается $0,5$ м³/ч трансформаторного масла от 95 до $40^\circ C$. Охлаждающая вода нагревается от 12 до $50^\circ C$, коэффициенты теплоотдачи: со стороны масла 200 , со стороны воды 800 Вт/(м²·К). Толщина стальной стенки 3 мм. Стенка покрыта слоями ржавчины и накипи толщиной по $0,5$ мм. Определить расход охлаждающей воды и необходимую поверхность теплообмена.

Задача 2. Требуется испарить 1600 кг/ч жидкости, поступающей в испаритель при температуре кипения $127^\circ C$. Теплота парообразования жидкости 377 кДж/кг. Нагрев происходит водяным паром при

давлении $4,76 \cdot 10^5$ Па. Определить расход греющего пара, если он: а) сухой насыщенный; б) перегретый до 250°C ; в) влажный насыщенный со степенью сухости $x = 0,8$. Водяной пар конденсируется полностью, конденсат отводится при температуре насыщения, теплоемкость перегретого пара принять $2,14$ кДж/(кг·К). Для случая а) определить необходимую поверхность теплообмена, если средний коэффициент теплопередачи 809 Вт/(м²·К).

Задача 3. На выпаривание в трехкорпусную установку подается S_0 тонн в час раствора NaOH с начальной концентрацией a_0 масс. Концентрация упаренного раствора a_3 масс. Из второго корпуса установки отбирается экстра пар в количестве 5000 кг/ч для нужд, не связанных с работой установки. Давление пара, обогревающего первый корпус $P_{\text{гп}} = 0,47$ МПа, давление вторичного пара, уходящего из последнего корпуса $P_{\text{бк}} = 0,02$ МПа. Распределить в первом приближении упариваемую воду по корпусам установки. Определить концентрации раствора в каждом корпусе установки.

Если между корпусами осуществляется отбор экстра пара в количестве E , кг/с, то количество растворителя, выпариваемого в последнем корпусе, определяется как [5]:

$$W_3 = \frac{W_{\text{общ}} - E}{n},$$

где n – число корпусов установки.

Таблица 1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_0 , т/ч	50	48	46	44	42	40	52	54	56	58
a_0 , %	10	10	8	8	9	12	12	15	15	13
a_3 , %	30	35	30	35	28	35	30	40	35	28

Указания к решению

Сначала определяется общее количество выпариваемой воды:

$$W = S_0 \left(1 - \frac{a_0}{a_3}\right).$$

По приведенной в условии задачи формуле находится количест-

во вторичного пара W_3 в третьем корпусе. Получающуюся разность $(W - W_3)$ следует распределить между первыми двумя корпусами в соотношении $W_2 = 1,1W_1$. Затем последовательно находятся потоки растворов после каждого аппарата S_1 , S_2 и S_3 . Для определения расчетных концентраций растворов a_1 , a_2 , a_3 на выходе из каждого аппарата следует использовать уравнение материального баланса по растворенному веществу:

$$S_i a_i = S_{i+1} a_{i+1}.$$

Контрольные задания и упражнения к темам 3-4

1. Вычислить состав равновесной паровой фазы при 60°C для жидкой смеси, характеризующейся мольными концентрациями бензола $x_{\text{бенз}} = 40\%$ и толуола $x_{\text{тол}} = 60\%$. Считать, что данная смесь характеризуется законом Рауля (для выполнения задания использовать уравнение Антуана, приложение 5).

2. Рассчитать равновесные концентрации пара для смеси метанол – вода, полагая ее идеальной. Давление в системе $p = 0,1$ МПа.

3. Определить температуру кипения и равновесный состав пара над смесью, состоящей из двух компонентов: бензол (мольная доля бензола $x_{\text{бенз}} = 0,30$) и толуол (мольная доля толуола $x_{\text{тол}} = 0,70$). Общее давление в системе $P = 930$ мм рт. ст. Смесью считать идеальной.

4. Построить кривую равновесия $y^p = f(x)$ при общем давлении $0,4$ МПа для смеси бензол – толуол, считая, что смесь подчиняется закону Рауля.

5. Определить минимальное флегмовое число для ректификационной колонны, в которой происходит разделение смеси метиловый спирт – вода. Концентрация метилового спирта в исходной смеси составляет $x_1 = 40\%$; дистиллят содержит $95,9\%$, а кубовый остаток $1,5\%$ метилового спирта.

6. Определить минимальное флегмовое число для ректификационной колонны, в которой происходит разделение смеси метиловый спирт – бензол от начальной массовой концентрации низкокипящего компонента метилового спирта, равной $a_1 = 25\%$ до конечной массовой концентрации $a_k = 94\%$. В кубовом остатке содержится $a_0 = 2\%$ метилового спирта.

7. Рассчитать равновесные концентрации и давления паров для смеси изопропиловый спирт – вода, полагая ее идеальной. Давление в системе 760 мм рт. ст.

8. Определить температуру кипения и равновесный состав пара над смесью, состоящий из трех компонентов с мольными долями: пропан ($x_{\text{пр}} = 0,3$), бутан ($x_{\text{бут}} = 0,5$), бензол ($x_{\text{бенз}} = 0,2$). Общее давление в системе 890 мм рт. ст. Смесью считать идеальной. Задачу решить методом последовательных приближений.

9. Перегонке подлежит 1000 кг смеси, содержащей по массе 60% этилового спирта и 40% воды. После перегонки массовое содержание спирта в кубовом остатке должно составлять 5% . Определить мольные концентрации в исходной смеси и в кубовом остатке.

10. 100 кмоль смеси бензол – толуол с мольной концентрацией

бензола 70% подвергают ректификации и получают 22,3 кмоль остатка с мольной концентрацией бензола 10%. Определить количество вещества в кубовом остатке и конечный состав дистиллята.

Задачи к темам 3-4

Задача 1. Определить графоаналитическим методом при помощи диаграмм равновесия $y^p = f(x)$ число тарелок для перегонки при атмосферном давлении смеси бензол – толуол от начальной мольной концентрации низкокипящего компонента бензола, равной $x_1 = 25\%$, до конечной мольной концентрации $x_k = 94\%$. В кубовом остатке содержится $x_0 = 2\%$ толуола.

Указания к решению

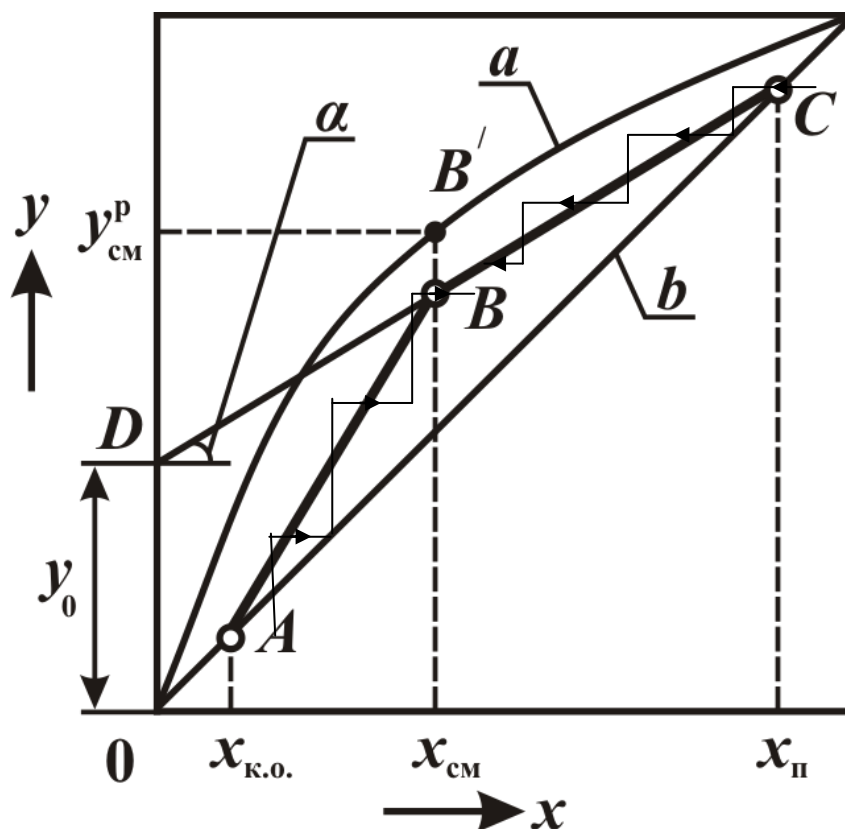


Рисунок 1 – Построение рабочей линии ректификационной колонны: AB – рабочая линия отгонной части колонны; BC – рабочая линия укрепляющей части колонны; отрезок OD численно равен y_0 ; $x_{см}$, $x_{п}$ и $x_{к.о.}$ – концентрации низкокипящего компонента в исходной смеси, получаемом продукте (жидком дистилляте) и кубовом остатке, соответственно; a – линия равновесного состояния смеси, b – линия $x = y$.

1. Строится кривая равновесия для заданной бинарной смеси в

координатах y, x . Для построения используются данные о равновесных концентрациях из таблицы (приложение 4).

2. На оси абсцисс откладывают заданные концентрации НКК в исходной смеси $x_{см}$, дистилляте $x_{п}$ и кубовой жидкости $x_{к.о.}$.

3. По кривой равновесия определяют равновесную к составу исходной смеси концентрацию НКК в паре $y_{см}^p$ (см. рисунок 1).

4. Определяют значения минимального R_{min} и рабочего R флегмового числа:

$$R_{min} = \frac{x_{п} - y_{см}^p}{y_{см}^p - x_{см}},$$
$$R = (1 + K) \cdot R_{min}, \text{ где } K = 0,3.$$

5. На диаграмме y, x наносятся реперные точки D ($y_0 = \frac{x_{п}}{1 + R}$, $x = 0$), C ($y = x_{п}$; $x = x_{п}$), и через них проводится рабочая линия CD для укрепляющей части колонны.

6. Определяются полные координаты точки B , для которой $x = x_{см}$. Ордината точки определяется из уравнения рабочей линии для укрепляющей части колонны и одинаковой в нее $x = x_{см}$:

$$y_B = \frac{1}{1 + R} x_{п} + \frac{R}{1 + R} x_{см}.$$

7. Через реперные точки A ($y = x_{к.о.}$; $x = x_{к.о.}$) и B ($y = y_B$; $x = x_{см}$) проводится рабочая линия для отгонной части колонны.

8. Графическим построением определяют число теоретических ступеней для укрепляющей и отгонной частей колонны.

Задача 2. Определить тепловую мощность для кипятильника ректификационной колонны, в которую для разделения при давлении 760 мм рт. ст. поступает G кг/час смеси бензол-толуол с начальной массовой концентрацией бензола $a_1 = 30\%$. Конечная массовая концентрация бензола $a_k = 93\%$. В кубовом остатке содержится 4% бензола. Флегмовое число $R=1,9$. В колонну смесь поступает при температуре насыщения. Отводимые из колонны продукт и кубовый остаток представляют жидкости, находящиеся при температуре кипения (не переохлажденные жидкости). Расчет выполнить без учета потерь

в окружающую среду.

Таблица 2

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G , кг/час	4200	4400	4600	4800	5000	5200	5400	5600	5800	6000

Указания к решению

1. Из материального баланса для НКК по уравнению:

$$P = G \frac{x_{\text{см}} - x_{\text{к.о.}}}{x_{\text{п}} - x_{\text{к.о.}}}$$

определяются количество получаемого продукта P , кг/с. Выход кубовой жидкости представляет разность:

$$M = G - P.$$

2. Количество теплоты, подводимое в кипятильнике $Q_{\text{кип}}$, рассчитывается по уравнению:

$$Q_{\text{кип}} = Ph_{\text{п}} + Mh_{\text{к.о.}} + Q_{\text{конд}} - G_{\text{см}}h_{\text{см}}.$$

3. Поскольку исходная смесь и разделенные компоненты представляют собой жидкости, их удельные энтальпии рассчитывают с использованием теплоемкостей чистых компонент по аддитивному правилу:

$$\begin{aligned} h_{\text{п}} &= C_{\text{п}} t'_{\text{п}} = [C_{\text{НКК}} x_{\text{п}} + C_{\text{ВКК}} (1 - x_{\text{п}})] \cdot t'_{\text{п}}; \\ h_{\text{к.о.}} &= C_{\text{к.о.}} t'_{\text{к.о.}} = [C_{\text{НКК}} x_{\text{к.о.}} + C_{\text{ВКК}} (1 - x_{\text{к.о.}})] \cdot t'_{\text{к.о.}}; \\ h_{\text{см}} &= C_{\text{см}} t'_{\text{см}} = [C_{\text{НКК}} x_{\text{см}} + C_{\text{ВКК}} (1 - x_{\text{см}})] \cdot t'_{\text{см}}. \end{aligned}$$

где $C_{\text{НКК}}$ и $C_{\text{ВКК}}$ – удельные массовые теплоемкости жидких компонентов бинарной смеси;

$t'_{\text{п}}$, $t'_{\text{к.о.}}$ и $t'_{\text{см}}$ – температуры кипения бинарных смесей, представляющих дистиллят, кубовую жидкость и исходную смесь.

Удельные теплоемкости чистых жидких веществ, представляющих низкокипящий и высококипящий компоненты, берутся из таблицы (приложение 6). Температуры кипения смесей соответствующего состава приведены в таблице (приложение 4).

4. Количество теплоты, отводимой в конденсаторе, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{конд}} = D \cdot r = (P + L) \cdot r.$$

Поскольку $L = R \cdot P$, то уравнение можно представить в следующем виде:

$$Q_{\text{конд}} = P \cdot (1 + R) \cdot r_{\text{п}},$$

где P и R найдены ранее, $r_{\text{п}}$ – удельная теплота парообразования (конденсации) дистиллята, поступающего в конденсатор. Для бинарной смеси $r_{\text{п}}$, как и удельная теплоемкость, рассчитывается по аддитивному правилу:

$$r_{\text{п}} = r_{\text{НКК}} \cdot x_{\text{п}} + r_{\text{ВКК}} \cdot (1 - x_{\text{п}})$$

здесь значения удельной теплоты испарения НКК и ВКК берутся из таблицы (приложение 7). Как можно видеть тепловая мощность конденсатора зависит от флегмового числа R . Таким образом, от выбора R зависит и количество теплоты, подводимое в кипятильнике. Возвращаемый в колонну поток флегмы «перекачивает» теплоту от кипятильника к конденсатору.

5. Используя полученные результаты, по формуле п. 2 рассчитывается тепловая мощность кипятильника.

Контрольные задания и упражнения к темам 5-6

Сушка – это испарение влаги из материала с отводом образующихся паров, представляющая собой совокупность процессов переноса тепла и массы и сопровождающаяся структурно-механическими изменениями высушиваемого вещества.

Существуют следующие виды сушки:

а) *контактная сушка* – теплота от теплоносителя к материалу передается через разделяющую их стенку;

б) *конвективная сушка* – теплота передается при непосредственном соприкосновении высушиваемого материала с сушильным агентом;

в) *диэлектрическая сушка* – теплота в материале выделяется под воздействием токов высокой частоты;

г) *сублимационная сушка* – материал высушивается в замороженном состоянии при глубоком вакууме;

д) *радиационная сушка* – теплота передается инфракрасными лучами.

1. Температура влажного воздуха $t = 25^\circ\text{C}$, а температура точки росы $t_p = 25^\circ\text{C}$. Определить с использованием $h-d$ диаграммы (приложение 8) относительную влажность воздуха $\varphi_{\text{возд}}$, удельную энтальпию h , массовое влагосодержание d и парциальное давление пара P_p .

2. Температура влажного воздуха $t = 60^\circ\text{C}$, относительная влажность $\varphi = 30\%$. Требуется определить с помощью $h-d$ диаграммы (приложение 8) другие параметры смеси.

3. На сушку поступает суспензионный полистирол с расходом $G_1 = 1$ кг/с, его влажность $u_1 = 30\%$. Требуется получить высушенный продукт с влажностью $u_2 = 1\%$. Определить количество высушенного полистирола G_2 и количество удаляемой воды ΔW .

4. В сушилку поступает $G_1 = 1$ т/ч материала влажностью $u_1 = 75\%$. Влажность материала на выходе из сушилки $u_2 = 8\%$. Определить количество удаляемой из материала влаги ΔW . Каково влагосодержание исходного и конечного продукта?

Решение. Уравнение материального баланса по абсолютно сухому материалу:

$$G_1(1 - u_1) = G_2(1 - u_2) = 1000 (1 - 0,75) = 250 \text{ кг/ч.}$$

Производительность сушилки по высушенному продукту влажностью

$u_2 = 8\%$:

$$G_2 = \frac{G_1 \cdot (1 - u_1)}{(1 - u_2)} = \frac{250}{1 - 0,08} = 271 \text{ кг/ч.}$$

Количество удаляемой из материала влаги:

$$\Delta W = G_1 - G_2 = 1000 - 271 = 729 \text{ кг/ч.}$$

Влагосодержание поступающего в сушилку сырья:

$$w_1 = \frac{G_1 - G_{\text{н.л.}}}{G_{\text{н.л.}}} \cdot 100 = \frac{1000 - 250}{250} \cdot 100 = 300\%.$$

Влагосодержание выходящего из сушилки материала:

$$w_2 = \frac{G_2 - G_{\text{н.л.}}}{G_{\text{н.л.}}} \cdot 100 = \frac{271 - 250}{250} \cdot 100 = 8,4\%.$$

5. Определить расход воздуха L на сушку полистирола при $G_1 = 1$ кг/с, $u_1 = 30\%$, $G_2 = 0,707$ кг/с, $u_2 = 1\%$, $\Delta W = 0,293$ кг/с. Исходный воздух имеет температуру $t_0 = 20^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi_0 = 67\%$ ($d_0 = 0,01$ кг влаги/кг а.с.в.). Отработанный воздух имеет температуру $t_2 = 60^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi_0 = 30\%$ ($d_2 = 0,04$ кг влаги/кг а.с.в.).

6. Определить подачу вытяжного вентилятора теоретической сушилки производительностью 500 кг/ч по высушенному материалу. Влажность поступающего в сушилку материала $u_1 = 80\%$, а выходящего $u_2 = 12\%$. Параметры воздуха до калорифера: $t_0 = 20^\circ\text{C}$, влажность $\varphi_0 = 70\%$. На выходе из сушилки температура воздуха $t_2 = 40^\circ\text{C}$, а влажность воздуха $\varphi_0 = 80\%$.

7. Определить массу силикагеля, служащего для поглощения паров воды из воздуха, которую необходимо загрузить в камеру сгорания ЖРД, находящегося на длительном хранении, если объем камеры сгорания равен $V = 3 \text{ м}^3$. Двигатель законсервирован при относительной влажности 60% и температуре окружающего воздуха 20°C . Согласно техническим условиям двигатель должен храниться при относительной влажности 50% и температуре от 0 до $+40^\circ\text{C}$. Поглоща-

тельная способность 1 кг силикагеля 0,2 кг воды.

8. Влажный воздух с температурой $t_0 = 30^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi_0 = 20\%$ нагревается в калорифере до температуры $t_2 = 60^\circ\text{C}$. Определить с помощью диаграммы в конечной точке относительную влажность воздуха и удельный расход теплоты на подогрев воздуха.

9. Определить удельную тепловую мощность калорифера, если параметры воздуха перед ним $h_0 = 45$ кДж/кг, $d_0 = 10$ г.вл./кг с.в. и температура воздуха после калорифера $t_2 = 140^\circ\text{C}$.

10. Влажный воздух с начальной температурой 90°C и относительной влажностью 10% охлаждается до температуры 10°C . Определить количество сконденсировавшейся влаги.

Задачи к темам 5-6

Задача 1. При давлении $p = 10^5$ Па, температуре $t = 10^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\varphi_{\text{возд}} = 0,8$ объем сухого воздуха, проходящего через воздухоохладитель, составляет V м³/с. По техническим условиям производства воздух при прохождении через воздухоохладитель должен охлаждаться до 0°C . Определить количество теплоты, которое необходимо отнять для охлаждения воздуха, и массу влаги, выпадающей на поверхности охладителя за 1 секунду.

Таблица 3

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$V, \text{ м}^3/\text{с}$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

Указания к решению

Решение задачи выполняется с использованием $h-d$ диаграммы влажного воздуха.

1. По диаграмме определяют парциальное давление паров влаги. Затем, вычитая его из атмосферного давления, находят парциальное давление сухого воздуха $p_{\text{св}}$.

2. Рассчитывают массовый расход сухого воздуха по уравнению Клапейрона – Менделеева:

$$L = p_{\text{св}}V/(RT).$$

3. С помощью диаграммы определяют начальное и конечное влагосодержания охлаждаемого воздуха d_1 и d_2 , а также энтальпии h_1 и h_2 .

4. Количество ежесекундно удаляемой влаги составит $L(d_1 - d_2)$.

5. Количество теплоты, отнимаемое в охладителе, равно $L(h_1 - h_2)$.

Задача 2. На сушку поступает G_1 т/ч угольного концентрата с начальной влажностью u_1 % масс. Влажность высушенного материала $u_2 = 7\%$ масс. Начальная температура материала 10°C , конечная температура 50°C . Определить количество удаляемой влаги W и удельный расход теплоты q на подогрев материала, если теплоемкость сухого угля $1,1$ кДж/кг К.

Таблица 4

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
G_1 , т/ч	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
u_1 , %	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14

Указания к решению

1. Последовательно рассчитываются: содержание влаги в поступающем на сушку угле, масса сухого угля, количество высушенного угля и содержание влаги в высушенном угле.

2. По изменению содержания влаги в поступающем и высушенном угле находят количество удаляемой влаги.

3. Определяют удельную теплоемкость подогретого влажного материала по конечной влажности угля (затраты тепла на удаление избыточной влаги рассчитываются отдельно).

4. Определяют количество теплоты на подогрев по расходу высушенного угля. Если отнести общее количество теплоты к величине удаленной влаги, получится удельный расход теплоты на единицу удаленной влаги.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Физические свойства воды на линии насыщения

t	$p \cdot 10^{-5}$	ρ	h	c_p	$\lambda \cdot 10^2$	$\alpha \cdot 10^8$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^4$	$\sigma \cdot 10^4$	Pr
°C	Па	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Па·с	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{К}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	
0	0,006108	999,9	0	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	756,4	13,67
10	0,012271	999,7	42,04	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	+0,70	741,6	9,52
20	0,02337	998,2	83,91	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,02
30	0,04241	995,7	125,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	712,2	5,42
40	0,07375	992,2	167,5	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	696,5	4,31
50	0,12335	988,1	209,3	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	676,9	3,54
60	0,1992	983,1	251,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	662,2	2,98
70	0,3116	977,8	293,0	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	643,5	2,55
80	0,4736	971,8	355,0	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	625,9	2,21
90	0,7011	965,3	377,0	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	607,2	1,95
100	1,0132	958,4	419,1	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	68,5	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	68,6	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,36
140	3,61	926,1	589,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,0	675,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	67,9	17,3	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	67,4	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,00

Продолжение приложения 1

t	$p \cdot 10^{-5}$	ρ	h	c_p	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^8$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	$\beta \cdot 10^4$	$\sigma \cdot 10^4$	Pr
°C	Па	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Па·с	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\frac{1}{\text{К}}$	$\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	
190	12,55	876,0	807,8	4,459	67,0	17,1	144,2	0,165	12,6	400,2	0,96
200	15,55	863,0	852,5	4,505	66,3	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,93
210	19,08	852,8	897,7	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	14,1	354,1	0,91
220	23,20	840,3	943,7	4,614	64,5	16,6	124,6	0,148	14,8	331,6	0,89
230	27,98	827,3	990,2	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	15,9	310,0	0,88
240	33,48	813,6	1037,5	4,756	62,8	16,2	114,8	0,141	16,8	285,5	0,87
250	39,78	799,0	1085,7	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	18,1	261,9	0,86
260	46,94	784,0	1135,7	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	19,7	237,4	0,87
270	55,05	767,9	1185,7	5,070	59,0	15,1	102,0	0,133	21,6	214,8	0,88
280	64,19	750,7	1236,8	5,230	57,4	14,6	98,1	0,131	23,7	191,3	0,90
290	74,45	732,3	1290,0	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	26,2	168,7	0,93
300	85,92	712,5	1344,9	5,736	54,0	13,2	91,2	0,128	29,2	144,2	0,97
310	98,70	691,1	1402,2	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	32,9	120,7	1,03
320	112,90	667,1	1462,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	38,2	98,10	1,11
330	128,65	640,2	1526,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	43,3	76,71	1,22
340	146,08	610,1	1594,8	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	53,4	56,70	1,39
350	165,37	574,4	1671,4	9,504	43,0	7,88	72,6	0,126	66,8	38,16	1,60
360	186,74	528,0	1761,5	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	109	20,21	2,35
370	210,53	450,5	1892,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	164	4,709	6,79

Физические свойства водяного пара на линии насыщения

t	$p \cdot 10^{-5}$	ρ	h	r	c_p	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^8$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
°С	Па	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Па·с	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,942	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,2	1765,6	3,881	4,291	0,658	17,76	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801,1	1715,8	4,158	4,512	0,544	18,25	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796,5	1661,4	4,468	4,803	0,453	18,84	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2789,8	1604,4	4,815	5,106	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2779,7	1542,9	5,324	5,489	0,317	19,91	0,600	1,90

Продолжение приложения 2

t	$p \cdot 10^{-5}$	ρ	h	r	c_p	$\lambda \cdot 10^2$	$a \cdot 10^8$	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$	Pr
°C	Па	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Па·с	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	
290	74,45	39,15	2766,4	1476,3	5,694	5,827	0,261	20,60	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749,2	1404,3	6,280	6,268	0,216	21,29	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727,4	1325,2	7,118	6,838	0,176	21,98	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700,2	1238,1	8,206	7,513	0,141	22,86	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2665,9	1139,7	9,881	8,257	0,108	23,94	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2621,9	1027,1	12,35	9,304	0,0811	25,21	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564,5	893,1	16,24	10,70	0,0580	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481,2	719,7	23,03	12,79	0,0396	29,14	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2330,9	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,75	0,166	11,10

Концентрация (массовая %) некоторых водных растворов, кипящих при атмосферном давлении

Растворенное вещество	Температура кипения, °С									
	101	103	105	107	110	120	125	140	160	180
<i>CaCl₂</i>	5,66	14,16	20,00	24,24	29,33	40,83	45,8	57,89	68,94	75,85
<i>KOH</i>	4,49	11,97	17,01	20,88	25,65	36,51	40,23	48,05	54,89	60,41
<i>KCl</i>	8,42	18,96	26,57	32,62	–	–	–	–	–	–
<i>K₂CO₃</i>	10,31	24,24	32,24	37,69	43,97	56,04	60,40	–	–	–
<i>KNO₃</i>	13,19	32,23	45,10	54,65	65,34	–	–	–	–	–
<i>MgCl₂</i>	4,67	11,66	16,59	20,32	24,41	33,07	36,02	38,61	–	–
<i>MgSO₄</i>	14,31	28,31	–	35,32	42,86	–	–	–	–	–
<i>NaOH</i>	4,12	10,15	14,53	18,53	23,08	33,77	37,58	48,32	60,13	69,97
<i>NaCl</i>	6,19	14,67	20,32	25,09	–	–	–	–	–	–
<i>NaNO₃</i>	8,26	21,87	32,43	40,47	49,87	68,94	–	–	–	–
<i>Na₂SO₄</i>	15,26	30,73	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>Na₂CO₃</i>	9,12	23,72	–	33,86	–	–	–	–	–	–
<i>CuSO₄</i>	26,95	40,83	–	–	–	–	–	–	–	–
<i>ZnSO₄</i>	20,00	37,89	46,15	–	–	–	–	–	–	–
<i>NH₄NO₃</i>	9,09	23,08	34,21	42,53	51,92	71,26	77,11	87,09	93,20	96,00
<i>NH₄Cl</i>	6,10	15,96	22,89	28,37	35,98	–	–	–	–	–
<i>(NH₄)₂SO₄</i>	13,34	30,65	41,79	49,73	–	–	–	–	–	–

Равновесные составы жидкости (x) и пара (y) в мол. % и температуры кипения (t) в °С двойных смесей при 760 мм рт. ст.

Смесь	\bar{x}	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Азеотропная смесь
Азотная кислота – вода	\bar{y} t	0 100	0,3 103,5	1,0 108,6	5,0 117,5	16,0 121,4	46,0 121,6	83,0 116	95,5 101,5	98,7 91,7	99,5 87,5	99,9 85,6	100 85,4	38,3 121,9
Ацетон – бензол	\bar{y} t	0 80,1	14 78,3	24,3 76,4	40 72,8	51,2 69,6	59,4 66,7	66,5 64,3	73 62,4	79,5 60,7	86,3 59,6	93,2 58,8	100 56,1	– –
Ацетон – вода	\bar{y} t	0 100	60,3 77,9	72 69,6	80,3 64,5	82,7 62,6	84,2 61,6	85,5 60,7	86,9 59,8	88,2 59	90,4 58,2	94,3 57,5	100 56,9	– –
Ацетон – метиловый спирт	\bar{y} t	0 64,5	10,2 63,6	18,6 62,5	32,2 60,2	42,8 58,7	51,3 57,6	58,6 56,7	65,6 56	72,5 55,3	80 55,05	– –	100 56,1	80 55,05
Ацетон – этиловый спирт	\bar{y} t	0 78,3	15,5 75,4	26,2 73	41,7 69	52,4 65,9	60,5 63,6	67,4 61,8	73,9 60,4	80,2 59,1	86,5 58	92,9 57	100 56,1	– –
Бензол – толуол	\bar{y} t	0 110,6	11,5 108,3	21,4 106,1	38 102,2	51,1 98,6	61,9 95,2	71,2 92,1	79 89,4	85,4 86,8	91 84,4	95,9 82,3	100 80,2	– –
Бензол – уксусная кислота	\bar{y} t	0 118,7	26 111,4	42 105,8	59 99	68,6 94	75 90,3	79 88	83 85,7	88 83,5	92,5 82	97 80,8	100 80,2	97,5 80
Вода – уксусная кислота	\bar{y} t	0 118,1	9,2 115,4	16,7 113,8	30,3 110,1	42,5 107,5	53 105,8	62,6 104,4	71,6 103,3	79,5 102,1	86,4 101,3	93 100,6	100 100	– –
Изопропиловый спирт – вода	\bar{y} t	0 100	48,5 84,4	53 82,5	60 81,2	64 81	66,5 80,6	68 80,5	68,4 80,4	70 80,5	77 81	83 82,3	100 82,4	68,5 80,4

Продолжение приложения 4

Смесь	\bar{x}	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	Азеотропная смесь
Метиловый спирт – бензол	\bar{y}	0	38,5	50	56	58	59	60	61	61	66	75	100	61,4
	t	80,2	66,9	61,1	58,6	58	57,8	57,7	57,6	57,6	58	59,6	64,9	57,6
Метиловый спирт – вода	\bar{y}	0	26,8	41,8	57,9	66,5	72,9	77,9	82,5	87	91,5	95,8	100	–
	t	100	92,3	87,7	81,7	78	75,3	73,1	71,2	69,3	67,6	66	64,5	–
Метиловый спирт – этиловый спирт	\bar{y}	0	7,4	14,3	27,1	39,6	51,5	62,6	72,3	79,8	86,6	93,2	100	–
	t	78,3	77,2	76,5	75	73,6	72,2	70,8	69,4	68,2	66,9	65,9	64,9	–
Муравьиная кислота – уксусная кислота	\bar{y}	0	8	14,6	26	38	48,5	57,6	66	74,6	83,6	92,2	100	–
	t	118,1	116	115,4	112,8	110,7	108,8	107	105,4	103,9	102,5	101,4	100,8	–
Сероуглерод – ацетон	\bar{y}	0	19	29	46	53,3	57,5	60,5	61	68	72,2	78	100	61
	t	56,2	51,2	48,3	43,5	41,3	40,3	39,6	39,3	39,3	39,6	40,9	46,3	39,3
Сероуглерод – четыреххлористый углерод	\bar{y}	0	13,2	24	42,3	54,4	64,5	72,6	79,1	84,4	90,1	95	100	–
	t	76,7	73,7	71	66	62,3	59	56,1	53,7	51,6	49,6	47,9	46,3	–
Толуол – уксусная кислота	\bar{y}	0	15,5	25,5	37,2	46	54,1	57	61,5	66,5	71,8	81	100	62,7
	t	118,1	111,3	108,9	105,6	103,3	101,7	100,8	100,6	100,6	100,9	102,6	110,8	100,6
Хлороформ – бензол	\bar{y}	0	6,5	12,6	27,2	41	54,6	66	74,6	83	90,5	96,2	100	–
	t	80,6	80,1	79,6	78,4	77,2	75,9	74,5	73,1	71	68,7	65,7	61,5	–
Четыреххлористый углерод – этиловый спирт	\bar{y}	0	21	33	48	54	56,5	58,8	62	65,8	72,2	82,3	100	63
	t	77,9	73,7	70,8	67,2	65,3	64,6	64	63,6	64	65,6	68,5	75,9	63,6
Этиловый спирт – бензол (750 мм рт. ст.)	\bar{y}	0	18	28,6	36,8	40,5	43,5	46,5	49,5	53,5	60	71	100	44,8
	t	79,7	74,3	71,2	69	68,2	67,8	67,8	68,3	68,9	70,1	72,6	78,1	67,8
Этиловый спирт – вода	\bar{y}	0	33,2	44,2	53,1	57,6	61,4	65,4	69,9	75,3	81,8	89,8	100	89,4
	t	100	90,5	86,5	83,2	81,7	80,8	80	79,4	79	78,6	78,4	78,4	78,15

Нормальные температуры кипения и коэффициенты уравнения Антуана для расчета давления паров индивидуальных веществ ($P = 760$ мм рт. ст.) [5]

$$\ln P = A - \frac{B}{(T + C)}$$

№ п/п	Название	Формула	$T_{\text{кип}}, \text{K}$	Коэффициенты		
				A	B	C
1	Бензол	C_6H_6	353,3	15,9008	2788,51	-52,36
2	Бутан	C_4H_{10}	272,7	15,6782	2154,90	-34,42
3	Вода	H_2O	373,2	18,3036	3816,44	-46,13
4	Изопропил	C_3H_8O	355,4	18,6929	3640,20	-53,54
5	Метанол	CH_4O	337,8	18,5875	3626,55	-34,29
6	Пропан	C_3H_8	231,1	15,7260	1872,46	-25,16
7	Толуол	C_7H_8	383,8	16,0137	3096,52	-53,67

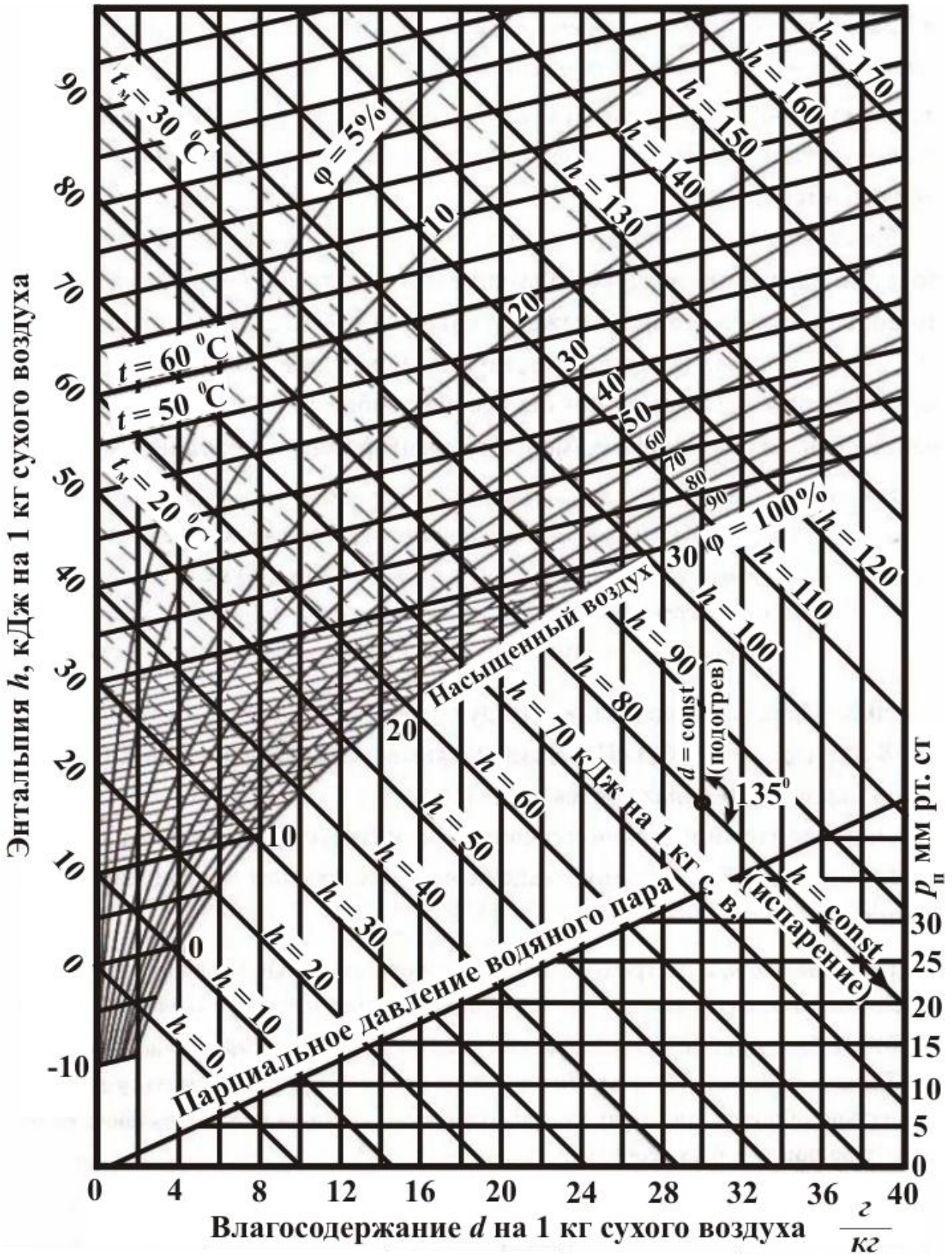
Удельная теплоемкость жидких веществ и водных растворов
 Коэффициент пересчета в систему СИ: $\text{ккал/кг}\cdot\text{град}\times 4190 = \text{Дж/кг}\cdot\text{град}$

Вещество		Удельная теплоемкость, $\text{ккал/кг}\cdot\text{град}$							
		при -20 °C	при 0 °C	при 20 °C	при 40 °C	при 60 °C	при 80 °C	при 100 °C	при 120 °C
Азотная кислота:	100%	0,415	0,418	0,42	0,425	0,43	0,435	0,44	0,445
	50%	–	0,667	0,68	0,693	0,71	0,73	0,74	0,76
Аммиак жидкий		1,08	1,1	1,13	1,16	1,22	1,3	1,37	1,48
Аммиачная вода 25%-ная		–	1,03	1,03	1,04	1,06	1,08	1,1	1,13
Анилин		–	0,477	0,487	0,498	0,508	0,519	0,529	0,54
Ацетон		0,49	0,505	0,52	0,535	0,55	0,566	0,581	0,596
Бензол		–	0,39	0,413	0,436	0,46	0,483	0,506	0,52
Бутиловый спирт		0,47	0,503	0,555	0,607	0,66	0,712	0,765	0,817
Вода		–	1,01	0,999	0,998	1,0	1,01	1,01	1,02
Гексан		0,536	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536	0,536
Глицерин 50%-ный		–	0,85	0,85	0,84	0,84	–	–	–
Этиловый спирт		0,516	0,528	0,541	0,575	0,633	0,69	0,747	0,803
Дихлорэтан		0,232	0,253	0,274	0,296	0,317	0,339	0,361	0,382
Изопропиловый спирт		0,525	0,564	0,635	0,706	0,777	0,847	0,917	0,987
Толуол		0,363	0,385	0,407	0,429	0,451	0,473	0,494	0,506
Метиловый спирт:	100%	0,569	0,589	0,613	0,637	0,66	0,684	0,708	0,732
	40%	–	0,84	0,85	0,86	0,86	0,87	0,88	0,89

Теплота испарения жидких веществКоэффициент пересчета в систему СИ: $\text{ккал/кг} \times 4190 = \text{Дж/кг}$

Вещество								
	при 0°С	при 20°С	при 40°С	при 60°С	при 80°С	при 100°С	при 120°С	при 140°С
Аммиак	302	284	263	238	208	169	113	–
Ацетон	135	132	128	124	118	113	107	100
Бензол	107	104	101	97,5	94,3	90,5	86,7	82,6
Бутиловый спирт	168	164	160	156	151	146	140	134
Двуокись серы	91,9	84	76	67,6	59	50	39,9	31,4
Изопропиловый спирт	185	179	173	167	160	152	144	133
Метиловый спирт	286	280	273	265	253	242	227	213
Сероуглерод	89,4	87,6	85,1	82,2	79,1	75,5	71,7	67,4
Толуол	99	97,3	95,1	92,8	90,5	88	85,2	82,1
Уксусная кислота	–	84,1	87,2	89,6	91,6	93,1	93,2	91,8
Фреон Ф-12	37	34,6	31,6	27,9	23,3	16,2	7,5	–
Хлор	63,6	60,4	56,9	53	48,4	42,2	33,3	17
Хлорбензол	89,7	88,2	86,5	84,6	82,7	80,7	78,7	76,5
Хлороформ	64,8	62,8	61	59,1	57,2	55,2	53,2	51,2
Четыреххлористый углерод	52,1	51	49,7	48,2	46,2	44,3	42,3	40,1
Этилацетат	102	98,2	95,3	92,1	88,7	84,9	80,6	75,7
Этиловый спирт	220	218	215	210	203	194	182	170
Этиловый эфир	92,5	87,5	82,7	77,9	72,5	67,4	61,4	54,5

h-d диаграмма влажного воздуха при $p = 745$ мм рт. ст.
(993,3 гПа)



Список используемой литературы

Основная

1. Назмеев, Ю.Г. Теплообменные аппараты ТЭС: уч. пособие для вузов / Ю.Г. Назмеев, В.М. Лавыгин. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 260 с.
2. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / В.Г. Анштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.; под ред. В.Г. Анштейна. – М.: Логос; Высшая школа, 2003. – Кн. 1, 2. 912 с. и 872 с.
3. Боровков, В.М. Тепломассообменное оборудование: уч. пособие / В.М. Боровков, А.А. Колютник, В.В. Сергеев. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 232 с.
4. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов и др.; под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоиздат, 1986.
5. Ульянов, Б.А. Процессы химической технологии. В примерах и задачах: уч. пособие / Б.А. Ульянов, В.Я. Бадеников, В.Г. Ликучев. – Ангарск: АГТА, 2005. – 903 с.

Дополнительная

6. Процессы и аппараты химической технологии / Н.Н. Смирнов, М.И. Курочкина, А.И. Волжинский и др.; под ред. Н.Н. Смирнова – СПб: Химия, 1996. – 408 с.
7. Кириллов, П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М: Энергоиздат, 1984. – 296 с.
8. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / Под общей ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – Кн. 4: Теплоэнергетика и теплотехника. – 632 с.
9. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Изд-во МЭИ, 1999. – 168 с.
10. Сборник примеров и задач по тепломассообменным процессам, аппаратам и установкам: уч. пособие / Л.И. Архипов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов, А.Л. Ефимов, С.И. Коновальцев; под ред. А.Л. Ефимова. – М.: Изд-во МЭИ, 1997. – Ч.1. – 116 с.
11. Сборник примеров и задач по тепломассообменным процессам, аппаратам и установкам: уч. пособие / Под ред. А.Л. Ефимова. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Ч.1. – 112 с.

12. Павлов, К.Д. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Д. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Л.: Химия, 1969. – 624 с.

13. Плановский, А.Н. Процессы и аппараты химической технологии / А.Н. Плановский, В.М. Рамм, С.З. Каган. – М.: Химия, 1968. – 848 с.

14. Таиров, Э.А. Тепломассообменное оборудование предприятий: практикум / Э.А. Таиров, В.Д. Очиров. – Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2013. – 122 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Тема 1. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ.....	4
Тема 2. ВЫПАРНЫЕ АППАРАТЫ И УСТАНОВКИ.....	5
Тема 3. КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫЕ УСТАНОВКИ.....	7
Тема 4. ДИСТИЛЛЯЦИЯ И РЕКТИФИКАЦИЯ.....	8
Тема 5. АБСОРБЦИЯ И АДСОРБЦИЯ.....	10
Тема 6. СУШКА ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	11
Контрольные задания и упражнения к темам 1-2.....	13
Задачи к темам 1-2.....	14
Контрольные задания и упражнения к темам 3-4.....	17
Задачи к темам 3-4.....	18
Контрольные задания и упражнения к темам 5-6.....	22
Задачи к темам 5-6.....	24
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	26
Список используемой литературы.....	38

Э.А. Таиров

ТЕПЛОМАССООБМЕННОЕ
ОБОРУДОВАНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ:
методические указания и задания
к выполнению контрольных работ студентов вузов

Лицензия на издательскую деятельность

ЛР № 070444 от 11.03.98 г.

Подписано в печать __.__.2015 г.

Тираж 50 экз.

Издательство Иркутского государственного
аграрного университета им. А.А. Ежевского
664038, Иркутская обл., Иркутский район
пос. Молодежный