

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

**ФГОУ ВПО «БРЯНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»**

В.И. Чащинов

**ТЕПЛОТЕХНИКА
ДЛЯ
АГРОИНЖЕНЕРОВ**

В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ

ЧАСТЬ I
(Термодинамика и теплопередача)

Брянск 2009

УДК 621.1 (075)

ББК 31.31

Ч – 30

В.И. Чащинов. ТЕПЛОТЕХНИКА ДЛЯ АГРОИНЖЕНЕРОВ В ВОПРОСАХ И ОТВЕТАХ: Учебное пособие для студентов инженерного факультета. – Брянск: Изд. БГСХА, 2009. – 98 с.

В учебном пособии в форме вопросов и ответов излагаются основные понятия технической термодинамики и теплопередачи.

Настоящее издание может использоваться студентами в качестве справочника по основным вопросам технической термодинамики и теплопередачи, а также как дополнительное пособие при подготовке к экзаменам и текущему контролю по теплотехнике.

Рецензенты:

заслуженный деятель науки и техники РФ, д.т.н., профессор
В.Т. Буглаев (кафедра «Турбины и теплоэнергетика» Брянского государственного университета);

к.т.н., доцент А.М. Левшаков; к.т.н., доцент А.Г. Рыжикова (кафедра энергетике и АПП Брянской государственной инженерно-технологической академии).

Рекомендовано методической комиссией инженерно-технологического факультета Брянской государственной сельскохозяйственной академии для студентов очного и заочного обучения направления 660300 «Агроинженерия», протокол № 7 от 26 февраля 2008 г.

© Брянская ГСХА 2009

© В.И. Чащинов 2009

1. ТЕРМОДИНАМИКА

1.1. Основные понятия и определения

Что такое теплотехника?

Теплотехника – отрасль науки и техники, занимающаяся вопросами производства и использования теплоты в самых различных целях. Теоретической базой теплотехники являются техническая термодинамика и теория теплообмена.

Что собой представляет техническая термодинамика?

Предметом изучения технической термодинамики являются термомеханические системы, то есть системы, в которых происходят взаимные превращения теплоты и механической энергии (работы). Одна из основных задач, решаемых технической термодинамикой – разработка теории тепловых двигателей и установок таких, как двигатели внутреннего сгорания, паровые и газовые турбины, реактивные и ракетные двигатели, холодильные и компрессорные машины.

Что такое теплота?

Теплота – это форма проявления и количественная мера теплового движения (хаотического движения, микрочастиц, составляющих вещество).

Что такое механическая работа?

Механическая работа – форма проявления и количественная мера механического движения (упорядоченного движения тел или макрообъемов вещества).

Что такое термодинамическая (термомеханическая) система?

Под термодинамической системой понимают вещество или совокупность тел, находящихся во взаимодействии между собой и с окружающей средой.

Как классифицируют термодинамические системы?

По условиям взаимодействия с окружающей средой различают следующие виды систем:

- открытые;
- закрытые;
- адиабатные;
- замкнутые или изолированные

Открытые системы – это системы, которые могут обмениваться с окружающей средой и веществом и энергией (теплотой и механической работой).

Закрытые системы могут обмениваться с окружающей средой энергией, но не веществом.

Адиабатные системы являются теплоизолированными, то есть не обмениваются с окружающей средой теплотой.

Замкнутые или изолированные системы не обмениваются с окружающей средой ни веществом, ни энергией.

Что такое рабочее тело?

Под рабочим телом понимают вещество, составляющее термодинамическую систему. В качестве рабочего тела в термодинамических системах чаще всего используются газы, а также жидкости и их пары.

Что такое идеальный газ?

Под идеальным газом понимают газ, молекулы которого являются материальными точками (то есть имеют массу, но не имеют размеров), и в котором отсутствуют силы взаимодействия между молекулами.

Идеальный газ является довольно удобной теоретической моделью газообразных рабочих тел, позволяющей существенно упростить анализ термодинамических систем. При этом поведение реальных газов во многих случаях (при сравнительно невысоких давлениях и не слишком низких температурах) достаточно хорошо подчиняется законам идеального газа, что и позволяет широко использовать их для практических расчетов.

1.2. Термодинамические параметры состояния и уравнение состояния для идеальных газов

Что такое термодинамические параметры состояния рабочего тела (системы)?

Параметры состояния – это интенсивные или удельные (то есть не зависящие от количества вещества) физические величины, однозначно определяющие состояние рабочего тела или термодинамической системы.

К параметрам состояния относятся **термодинамическая температура, давление и удельный объем**. Вместо удельного объема в качестве параметра состояния можно использовать обратную ему величину – **плотность**.

Что собой представляет температура?

Температура характеризует степень нагретости тела или его тепловое состояние, проявляемое в интенсивности теплового движения микрочастиц. Термодинамическую температуру можно рассматривать как количественную меру интенсивности теплового движения, так как ее значение

пропорционально средней кинетической энергии микрочастиц вещества, совершающих тепловое движение.

Единицей измерения термодинамической температуры T является кельвин (K) и значения термодинамической температуры исчисляются по абсолютной шкале температур (шкале Кельвина). На практике для измерения температуры чаще пользуются шкалой Цельсия с единицей измерения – градус Цельсия ($^{\circ}C$). Как единицы измерения кельвин (K) и градус Цельсия ($^{\circ}C$) между собой равны. Соотношение же между температурой T , измеренной по термодинамической температурной шкале, и температурой t по шкале Цельсия имеет вид:

$$T = t + 273,15 \text{ K.}$$

Что такое давление?

Давление p представляет собой силу, приходящуюся на единицу площади поверхности и направленную по нормали к этой поверхности.

В жидкостях и газах давление проявляется как результат совокупного действия молекул, совершающих тепловое движение. Вследствие этого, давление в любой точке пространства, заполненного жидкостью или газом, действует одинаково во всех направлениях.

Основной единицей измерения давления в СИ является паскаль – Pa (N/m^2). Паскаль – единица маленькая, поэтому на практике чаще пользуются кратными единицами: килопаскаль ($1kPa = 10^3 Pa$) и мегапаскаль ($1Mpa = 10^6 Pa$).

Что такое удельный объем?

Удельный объем v – это объем, занимаемый единицей массы вещества, m^3/kg . Удельный объем является величиной, обратной плотности вещества.

Что такое плотность вещества?

Плотность вещества ρ – это масса единицы объема вещества, kg/m^3 . Плотность является величиной, обратной удельному объему.

Что собой представляет уравнение состояния для идеального газа?

Уравнение состояния выражает связь между параметрами состояния. Для идеального газа уравнение состояния (уравнение Клапейрона – Менделеева) имеет вид:

$$pv = RT \text{ - для одного кг газа ;}$$

$$pV = mRT \text{ - для произвольного количества газа, выраженного массой ;}$$

$$pV = M\bar{R}T \text{ - для произвольного количества газа, заданного в киломолях.}$$

В этих выражениях:

p – давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг;

R – газовая постоянная, Дж /кг К;

T – термодинамическая температура, К;

V – объем, м³;

m – масса, кг;

M – количество киломолей газа, кмоль;

\bar{R} – универсальная газовая постоянная, Дж /кмоль К.

Универсальная газовая постоянная имеет одинаковое значение для всех газов –

$$\bar{R} = 8314 \text{ Дж /кмоль К.}$$

Газовая постоянная, в общем случае, для каждого газа имеет свое значение, которое может быть найдено по формуле

$$R = \bar{R} / \mu = 8314 / \mu, \text{ Дж /кг К,}$$

где

μ – молярная масса (масса 1-го киломоля) газа, кг /кмоль.

В чем заключается физический смысл газовой постоянной?

Физический смысл газовой постоянной состоит в том, что она численно равна работе, совершаемой одним кг газа в изобарном процессе при увеличении его температуры на один К (°С). Для универсальной газовой постоянной – то же для одного киломоля.

1.3. Функции состояния

Что такое функции состояния?

Функции состояния – это количественные характеристики термодинамической системы, значения которых однозначно определяются параметрами состояния. Основными функциями состояния являются: *внутренняя энергия, энтальпия и энтропия*. В практических расчетах чаще пользуются удельными (приходящимися на единицу массы) значениями функций состояния. Обычно, при расчете их значений за условный нуль принимают состояние при давлении – 0,101 МПа и температуре – 0 °С.

Что такое внутренняя энергия?

Внутренняя энергия U , (Дж) представляет собой сумму кинетической энергии микрочастиц вещества, совершающих тепловое движение, и энергии их взаимодействия.

Внутренняя энергия одного килограмма вещества называется удельной внутренней энергией u , (Дж / кг).

Что такое энтальпия?

Энтальпия (ее еще называют теплосодержанием) I , (Дж) представляет собой сумму внутренней энергии и произведения давления на объем. Это произведение можно истолковать как потенциальную энергию, заключенную в объеме вещества. Таким образом для удельной энтальпии i , (Дж / кг) можно записать:

$$i = u + pv.$$

Что такое энтропия?

Энтропия – функция состояния, с помощью которой во многих случаях удобно рассчитывать количество теплоты в процессах. Она может быть определена из выражения ее дифференциала, которое для удельной энтропии имеет вид:

$$ds = dq / T,$$

где

dq – элементарное количество теплоты;

T – термодинамическая температура.

Что такое эксергия?

Эксергия (работоспособность) – максимальная работа, которую может совершить рабочее тело (система) при реализации обратимых термодинамических процессов до достижения равновесия с окружающей средой с параметрами p_0, T_0 . Понятие эксергии широко используется для анализа степени совершенства тепловых аппаратов и установок.

1.4. Теплоемкость

Что такое теплоемкость?

Под теплоемкостью обычно понимают количество теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы изменить его температуру на один кельвин или $^{\circ}\text{C}$.

В практических расчетах обычно пользуются значениями удельных теплоемкостей. Различают удельную массовую, удельную объемную и удельную молярную (мольную) теплоемкости, то есть теплоемкости соответствующей единицы количества вещества.

Таким образом:

Удельная массовая теплоемкость c (Дж/кг К) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному кг вещества, чтобы изменить его температуру на 1 К ($^{\circ}\text{C}$).

Удельная объемная теплоемкость c' (Дж/м³ К) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному м³ вещества (для газов – м³, приведенного к нормальным условиям, т. е. $p = 760$ мм рт. ст. и $t = 0$ $^{\circ}\text{C}$), чтобы изменить его температуру на 1 К ($^{\circ}\text{C}$).

Удельная молярная теплоемкость μC (Дж/кмоль К) – количество теплоты, которое нужно сообщить одному киломолю вещества, чтобы изменить его температуру на 1 К ($^{\circ}\text{C}$).

Часто удельную теплоемкость для краткости называют просто теплоемкостью, т. е. употребляют названия – массовая, объемная и молярная теплоемкость.

Как связаны между собой значения удельных теплоемкостей?

Массовая c , объемная c' и молярная μC теплоемкости связаны между собой следующими соотношениями:

$$c = \mu C / \mu, \quad c' = \mu C / 22,4; \quad c' = \rho_0 c,$$

где

μ – молярная масса, кг/кмоль ;

ρ_0 – плотность вещества при нормальных условиях, кг/м³.

От каких факторов зависит удельная теплоемкость для газов?

Теплоемкость газов зависит от рода газа, от температуры, в некоторой степени от давления и от характера процесса. При этом **наибольшее влияние на теплоемкость оказывает процесс**, в зависимости от которого значение теплоемкости может меняться от $-\infty$ до $+\infty$.

Теплоемкость определяется обычно опытным путем. В справочной литературе приводятся значения изохорных ($c_v, c'_v, \mu C_v$) и изобарных ($c_p, c'_p, \mu C_p$) теплоемкостей, то есть теплоемкостей для процессов при постоянном объеме и при постоянном давлении.

В практических расчетах, не требующих особой точности, зависимостью теплоемкости от температуры пренебрегают. В противном случае пользуются средней для данного интервала температур теплоемкостью, которую находят с использованием эмпирических формул или справочных таблиц.

Как связаны между собой изохорная и изобарная теплоемкости идеальных газов?

Между изохорной и изобарной теплоемкостями существует связь, выражаемая зависимостями:

$$c_p = c_v + R ; \quad \frac{c_p}{c_v} = \frac{c'_p}{c'_v} = \frac{\mu C_p}{\mu C_v} = k ,$$

где

R – газовая постоянная, Дж/кг К ;

k – показатель адиабаты.

Первая из приведенных зависимостей носит название формулы Майера.

Для идеальных газов в зависимости от атомности газа принимаются следующие значения показателя адиабаты:

$k = 1,67$ – для одноатомных газов;

$k = 1,4$ – для двухатомных газов;

$k = 1,29$ – для многоатомных газов.

Для идеального газа удельную массовую изохорную теплоемкость можно находить по формуле

$$c_v = \frac{R}{k - 1} .$$

1.5. Газовые смеси

Каким образом задают газовые смеси?

Чтобы задать газовую смесь необходимо назвать компоненты смеси и указать долю каждого компонента в смеси. Состав смеси задают массовыми, объемными или молярными долями.

Массовой долей компонента g_i называют отношение массы i -го газа m_i , входящего в смесь, к массе всей смеси $m_{см}$

$$g_i = m_i / m_{см} .$$

Объемной долей компонента r_i называют отношение приведенного объема i -го газа V_i , входящего в смесь, к объему всей смеси $V_{см}$

$$r_i = V_i / V_{см} .$$

Молярной долей компонента N_i называют отношение количества киломолей i -го газа M_i , входящего в смесь, к общему количеству киломолей смеси $M_{см}$

$$N_i = M_i / M_{см} .$$

Для любой газовой смеси, состоящей из n компонентов, выполняется условие

$$\sum_{i=1}^n g_i = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n N_i = 1 .$$

Какова связь между массовыми, объемными и молярными долями?

Массовые, объемные и молярные доли находятся в следующих соотношениях:

$$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i} ; \quad r_i = \frac{g_i / \mu_i}{\sum_{i=1}^n g_i / \mu_i} ; \quad r_i = N_i ,$$

где

μ_i – молярная масса i -го газа, входящего в смесь ;

n – число компонентов, входящих в смесь.

Что называется приведенным объемом газа, входящего в смесь?

Приведенным объемом газа называется объем, который занял бы один этот газ при температуре и давлении смеси.

В чем состоит закон Дальтона для газовых смесей?

Согласно закону Дальтона каждый газ, входящий в смесь, ведет себя так, как будто он один занимает весь объем, в котором находится смесь. По закону Дальтона давление смеси $p_{см}$ равно сумме парциальных давлений ее компонентов p_i

$$p_{см} = \sum_{i=1}^n p_i .$$

Что называется парциальным давлением газа, входящего в смесь?

Парциальным давлением газа, входящего в смесь, называется то давление, которое установилось бы в данном объеме, если из него удалить все другие компоненты смеси, при температуре смеси. Парциальное давление i -го газа может быть найдено по формуле

$$p_i = r_i p_{см}.$$

Как рассчитываются основные параметры газовой смеси?

Основные параметры смеси идеальных газов могут быть найдены из следующих соотношений.

Кажущаяся молярная масса смеси

$$\mu_{см} = \sum_{i=1}^n \mu_i r_i.$$

Плотность смеси

$$\rho_{см} = \sum_{i=1}^n \rho_i r_i.$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{см} = \sum R_i g_i \quad \text{или} \quad R_{см} = \frac{8314}{\mu_{см}}, \text{ Дж / кг K}.$$

Удельная массовая теплоемкость смеси

$$c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i c_i.$$

Удельная объемная теплоемкость смеси

$$c'_{см} = \sum_{i=1}^n r_i c'_i.$$

В этих формулах

r_i и g_i – соответственно объемная и массовая доля i -го компонента смеси;

μ_i , R_i , c_i , c'_i – соответственно молярная масса, газовая постоянная, удельные массовая и объемная теплоемкости i -го газа, входящего в смесь.

1.6. Общие сведения о термодинамических процессах

Что называется термодинамическим процессом?

Любое изменение во времени параметров состояния термодинамической системы называется термодинамическим процессом.

Как классифицируются термодинамические процессы?

Различают равновесные и неравновесные, обратимые и необратимые процессы.

Под *равновесным* понимают процесс, в ходе которого система проходит последовательность равновесных состояний. (*Равновесным считается состояние системы, когда во всех ее точках параметры состояния имеют одинаковые значения*).

В противном случае мы имеем *неравновесный* процесс.

Обратимыми являются процессы, протекающие без рассеяния энергии. Для таких процессов, если изменить ход процесса на обратный, система пройдет те же состояния, как и при прямом течении процесса, и может возвратиться в исходное состояние без каких-либо потерь энергии.

При необратимых процессах происходит рассеивание энергии и для возвращения системы в исходное состояние при таких процессах необходимы дополнительные затраты энергии.

Обратимыми могут быть только равновесные процессы. Обратимые термодинамические процессы могут быть представлены графически в координатах p - v и T - s .

Почему изображение процесса в координатах p - v называют рабочей диаграммой?

Изображение процесса в координатах p - v называют рабочей диаграммой, потому что площадь под графиком процесса в соответствующем масштабе равна работе, совершаемой в процессе.

Почему изображение процесса в координатах T - s называют тепловой диаграммой?

Изображение процесса в координатах T - s называют тепловой диаграммой, потому что площадь под графиком процесса в соответствующем масштабе равна теплоте в процессе.

1.7. Основные законы термодинамики

Как формулируется первый закон термодинамики для закрытых систем?

Первый закон термодинамики по существу является законом сохранения энергии применительно к термомеханическим системам и может быть сформулирован следующим образом:

Теплота, сообщенная системе, идет на приращение ее внутренней энергии и совершение работы.

Каково математическое выражение первого закона термодинамики для закрытых систем?

Для закрытых термодинамических систем математическое выражение первого закона в дифференциальной форме –

$$dq = du + dl$$

и в конечной форме –

$$q = \Delta u + l.$$

В этих выражениях

q – удельная теплота;

u – удельная внутренняя энергия;

l – удельная работа расширения.

Можно записать также математическое выражение первого закона термодинамики через энтальпию:

$$dq = di - v dp.$$

Как формулируется второй закон термодинамики?

Существует несколько формулировок второго закона термодинамики.

Теплота не может сама собой переходить от более холодного тела к более нагретому. (Р. Клаузиус, 1850 г.).

Невозможно построить периодически действующую машину, единственным результатом действия которой было бы получение работы за счет отнятия теплоты от некоторого источника. (В. Томпсон, 1851 г.).

Осуществление вечного двигателя (перпетуум мобиле) второго рода невозможно. (В. Оствальд.).

Под вечным двигателем первого рода понимают машину, которая производила бы работу, не получая энергии извне или производила бы ее больше получаемой энергии.

Под вечным двигателем второго рода понимают тепловую машину, которая всю полученную теплоту превращала бы в механическую работу.

Одна из наиболее общих формулировок принадлежит Больцману –

Любая система стремится к переходу от менее вероятных состояний к более вероятным.

В чем заключается суть второго закона термодинамики?

Суть второго закона термодинамики сводится к утверждению, что все реальные самопроизвольные процессы являются необратимыми, а энтропия изолированных систем, в которых осуществляются такие процессы, возрастает.

Второй закон термодинамики определяет возможное направление течения процессов или определяет условия, при которых возможно их осуществление.

Как выглядит математическая формулировка второго закона термодинамики?

Математическая формулировка второго закона термодинамики может быть представлена выражениями

$$dS \geq dQ / T ,$$

или для изолированной системы

$$dS \geq 0 .$$

В этих выражениях знак " $=$ " относится к обратимым процессам, а знак " $>$ " – к необратимым.

В чем заключается третий закон термодинамики?

Третий закон термодинамики был установлен В. Нернстом и известен еще как тепловая теорема Нернста: в любом изотермическом процессе, проведенном при абсолютном нуле температуры, изменение энтропии системы равно нулю. То есть при абсолютном нуле температуры изотермический процесс одновременно является изоэнтропийным.

Иногда третий закон термодинамики формулируют как принцип невозможности создания вечного двигателя третьего рода.

Под вечным двигателем третьего рода понимают тепловой двигатель, в котором бы осуществлялся цикл с отводом теплоты при абсолютном нуле температуры.

Следствием третьего закона термодинамики является положение о недостижимости абсолютного нуля температуры.

1.8. Основные термодинамические процессы в идеальных газах

Что собой представляет изохорный процесс?

Изохорный процесс – процесс, протекающий при постоянном объеме.

Уравнение процесса имеет вид

$$\frac{p}{T} = \text{const}.$$

Параметры состояния при изохорном процессе находятся в следующих соотношениях:

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_1}{T_1} \quad \text{или} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Как изображается изохорный процесс в координатах $p - v$ и $T - s$?

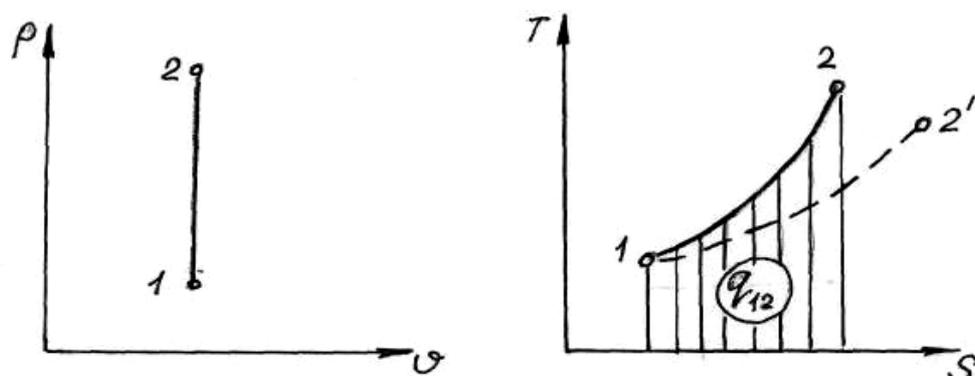


Рис.1.1. Изохорный процесс в координатах $p - v$ и $T - s$.

(На рисунке в координатах $T - s$ штриховой линией для сравнения изображен изобарный процесс)

Что собой представляет изобарный процесс?

Изобарный процесс – процесс, протекающий при постоянном давлении.

Уравнение процесса имеет вид

$$\frac{V}{T} = \text{const} .$$

Параметры состояния при изобарном процессе находятся в следующих соотношениях:

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1} \quad \text{или} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} .$$

Как изображается изобарный процесс в координатах $p - v$ и $T - s$?

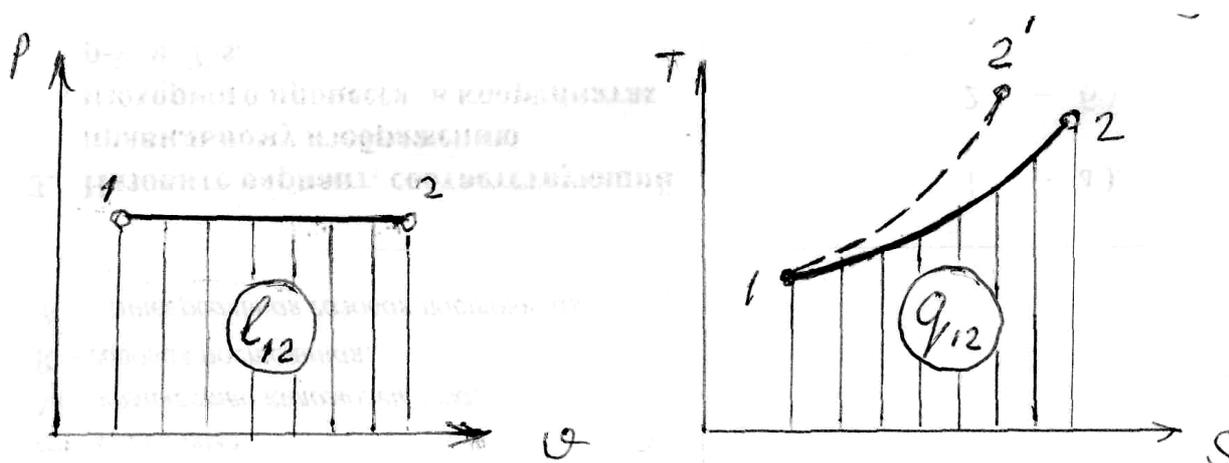


Рис.1.2. Изобарный процесс в координатах $p - v$ и $T - s$.

(На рисунке в координатах $T - s$ штриховой линией для сравнения изображен изохорный процесс).

Что собой представляет изотермический процесс?

Изотермический процесс – процесс, протекающий при постоянной температуре.

Уравнение процесса имеет вид

$$p V = \text{const} .$$

Параметры состояния при изотермическом процессе находятся в следующем соотношении:

$$p_2 V_2 = p_1 V_1 \quad \text{или} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2} .$$

Как изображается изотермический процесс в координатах $p - v$ и $T - s$?

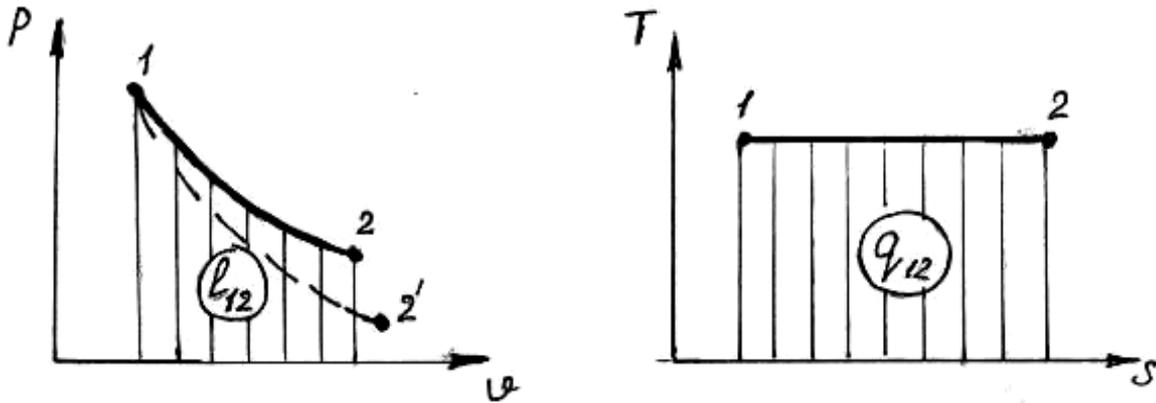


Рис.1.3. Изотермический процесс в координатах $p - v$ и $T - s$.

(На рисунке в координатах $p - v$ штриховой линией для сравнения изображен адиабатный процесс)

Что собой представляет адиабатный процесс?

Адиабатный процесс – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой.

Уравнение процесса имеет вид

$$pV^k = \text{const} .$$

Параметры состояния при адиабатном процессе находятся в следующих соотношениях:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} .$$

Как изображается адиабатный процесс в координатах $p - v$ и $T - s$?

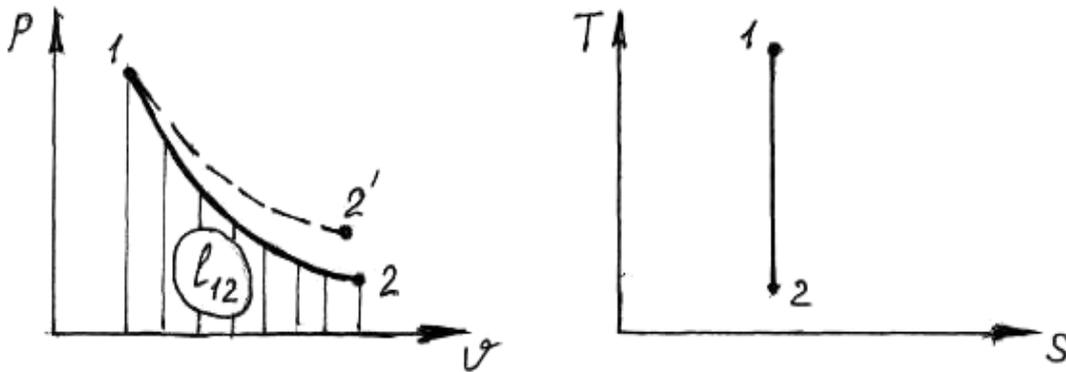


Рис.1.4. Адиабатный процесс в координатах $p - v$ и $T - s$.

(На рисунке в координатах $p - v$ штриховой линией для сравнения изображен изотермический процесс).

Что такое политропный процесс?

Политропным называется обобщающий термодинамический процесс, удовлетворяющий уравнению $pV^n = \text{const}$, для которого доля теплоты, идущая на изменение внутренней энергии, является величиной постоянной.

В приведенном уравнении процесса n – показатель политропы, имеющий постоянное значение для данного процесса. Значение показателя политропы в зависимости от характера процесса может находиться в пределах от $-\infty$ до $+\infty$.

Рассмотренные выше процессы являются частными случаями политропного процесса, каждому из которых соответствует свое значение показателя политропы. То есть мы имеем:

- при $n = \pm \infty$ – изохорный процесс;
- при $n = 0$ – изобарный процесс;
- при $n = 1$ – изотермический процесс;
- при $n = k$ – адиабатный процесс.

Какими соотношениями связаны между собой параметры состояния в политропном процессе?

Параметры состояния в политропном процессе связаны между собой следующими соотношениями:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} ; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} .$$

Что называется характеристикой политропного процесса?

Характеристикой политропного процесса называется доля теплоты в процессе, идущая на изменение внутренней энергии системы

$$\varphi = \frac{\Delta u}{q} .$$

Как связаны между собой показатель политропы n и характеристика процесса φ ?

Между показателем политропы и характеристикой политропного процесса существуют следующие соотношения:

$$n = \frac{k\varphi - 1}{\varphi - 1} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{n - 1}{n - k} .$$

Здесь k – показатель адиабаты .

Какая связь существует между теплоемкостью политропного процесса, его характеристикой и показателем политропы?

Теплоемкость политропного процесса c может быть найдена по формулам

$$c = \frac{c_v}{\varphi} \quad \text{или} \quad c = \frac{n - k}{n - 1} c_v .$$

В свою очередь показатель политропы может быть найден по значению теплоемкости процесса

$$n = \frac{c_p - c}{c_v - c} .$$

Здесь c_p и c_v – соответственно изобарная и изохорная теплоемкости.

Может ли теплоемкость иметь отрицательное значение?

Да, может – в политропных процессах с показателями политропы

$$1 < n < k .$$

Как изображаются политропные процессы в координатах $p - v$ и $T - s$?

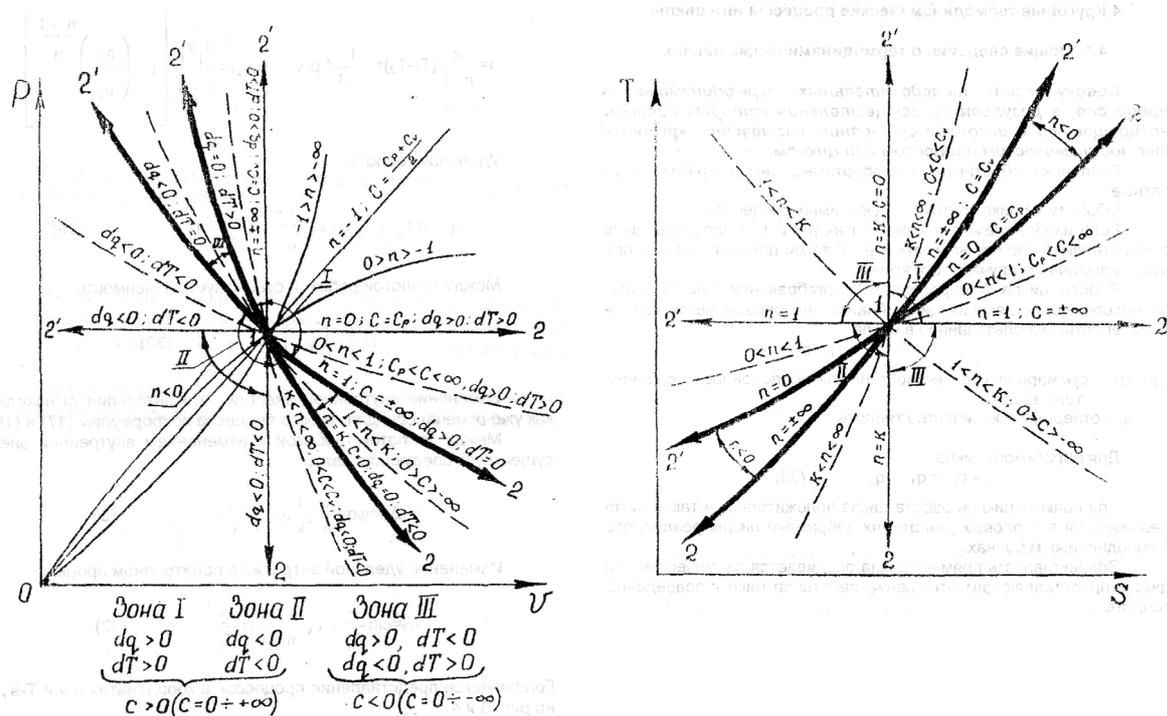


Рис.1.5. Представление политропных процессов в координатах $p - v$ и $T - s$.

1.9. Теплота, работа и изменение функций состояния в термодинамических процессах

Ниже приводятся сведения о том, как можно найти значения удельных значений указанных величин. Для получения экстенсивных параметров необходимо значения удельных умножить на массу.

Как определяется теплота в любом процессе?

Теплота в любом процессе может быть найдена по формулам:

$$q = c \Delta T \quad \text{или} \quad q = \int_1^2 T \cdot ds ;$$

где

c – средняя для интервала температур удельная массовая теплоемкость соответствующего процесса;

$\Delta T = T_2 - T_1$ – разность температур в начале и в конце процесса;

ds – дифференциал энтропии.

В частности, для изохорного процесса –

$$q = c_v \Delta T ;$$

для изобарного процесса –

$$q = c_p \Delta T ;$$

для изотермического процесса –

$$q = T \Delta s \quad \text{или} \quad q = l = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} ;$$

для адиабатного процесса –

$$q = 0 ;$$

для политропного процесса –

$$q = \frac{n - k}{n - 1} c_v \Delta T ;$$

Как определяется работа в любом процессе?

Работа в любом процессе может быть найдена по формуле

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv .$$

В частности, для изохорного процесса –

$$l = 0 ;$$

для изобарного процесса –

$$l = p(v_2 - v_1) ;$$

для изотермического процесса –

$$l = RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} \quad \text{или} \quad l = q ;$$

для адиабатного процесса –

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right];$$

для политропного процесса –

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right].$$

Как определяется изменение внутренней энергии в любом процессе?

Изменение внутренней энергии для любого процесса рассчитывается по формуле

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) = c_v \Delta T ,$$

где c_v – удельная массовая изохорная теплоемкость.

Как определяется изменение энтальпии в любом процессе?

Изменение энтальпии для любого процесса рассчитывается по формуле

$$\Delta i = c_p (T_2 - T_1) = c_p \Delta T ,$$

где c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость.

Как определяется изменение энтропии в любом процессе?

Изменение энтропии для любого процесса рассчитывается по формуле

$$\Delta s = c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} ,$$

где c – удельная массовая теплоемкость соответствующего процесса.

В частности, для изохорного процесса –

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} ;$$

для изобарного процесса –

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} ;$$

для изотермического процесса –

$$\Delta s = \frac{q}{T} = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} ;$$

для адиабатного процесса –

$$\Delta s = 0 ;$$

для любого политропного процесса –

$$\Delta s = c_v \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} ,$$

где

n – показатель политропы;

k – показатель адиабаты.

Какая связь существует между работой, теплотой и внутренней энергией в политропном процессе?

Между теплотой и работой существует следующая зависимость:

$$l = \frac{k-1}{k-n} \cdot q .$$

Между изменением внутренней энергии, теплотой и работой существует следующая связь:

$$\Delta u = \varphi \cdot q = \frac{n-1}{n-k} \cdot q = \frac{n-1}{1-k} \cdot l .$$

1.10. Общие сведения о круговых процессах или циклах

Что такое круговой процесс или цикл?

Круговым процессом или циклом называется совокупность последовательных термодинамических процессов, в результате осуществления которых система возвращается в исходное состояние.

Какова классификация циклов?

Различают *обратимые* и *необратимые* циклы, *прямые* и *обратные* циклы.

Обратимый цикл состоит из обратимых процессов.

Если хотя бы один из процессов, входящих в цикл, является необратимым, то и цикл будет *необратимым*.

Если изображаемые в координатах $p - v$ и $T - s$ процессы цикла осуществляются по часовой стрелке, то такой цикл называется *прямым*, в противном случае – *обратным*.

Каковы соотношения между теплотой и работой в циклах?

Работа за цикл $l_{\text{ц}}$ определяется алгебраической суммой работ всех процессов, составляющих цикл. Аналогично, теплота, использованная в цикле, $q_{\text{ц}}$ равна алгебраической сумме теплоты всех процессов цикла.

Для обратимых циклов

$$l_{\text{ц}} = q_{\text{ц}} = q_1 - q_2 \text{ ,}$$

где

q_1 – суммарное количество теплоты, подведенное к рабочему телу за цикл;

q_2 – отведенное за цикл количество теплоты.

В чем состоит принципиальное отличие прямых и обратных циклов?

Для прямых циклов работа цикла положительна, и такие циклы реализуются в тепловых двигателях – установках для получения механической работы за счет подводимой к рабочему телу теплоты.

Обратные циклы реализуются в холодильных установках, в которых за счет затраченной работы теплота отводится от холодного источника (охлаждаемого объема) и отдается более нагретому.

Как оценивается эффективность циклов?

Эффективность прямого цикла оценивается термическим КПД цикла, представляющим собой отношение работы цикла к количеству теплоты, подведенной за цикл.

$$\eta_t = \frac{l_u}{q_1}.$$

Для обратимого цикла

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Для обратного цикла в качестве показателя эффективности используют холодильный коэффициент, представляющий собой отношение теплоты, отводимой от охлаждаемого объема, к работе, затрачиваемой в цикле.

$$\varepsilon_x = \frac{q_2}{l_u}.$$

Для обратимого цикла соответственно

$$\varepsilon_x = \frac{q_2}{q_1 - q_2},$$

где

q_1 – количество теплоты, отдаваемое более нагретому телу.

1.11. Идеальные циклы тепловых двигателей

Что понимают под идеальным циклом теплового двигателя?

Под идеальным циклом теплового двигателя понимают цикл, состоящий из обратимых процессов. В качестве рабочего тела принимается идеальный газ с постоянной теплоемкостью. Подвод теплоты осуществляется от внешнего источника, а процессы выпуска рабочего тела заменяются обратимыми процессами отвода теплоты.

Что собой представляет цикл Карно?

Цикл Карно состоит из четырех процессов: двух изотерм и двух адиабат

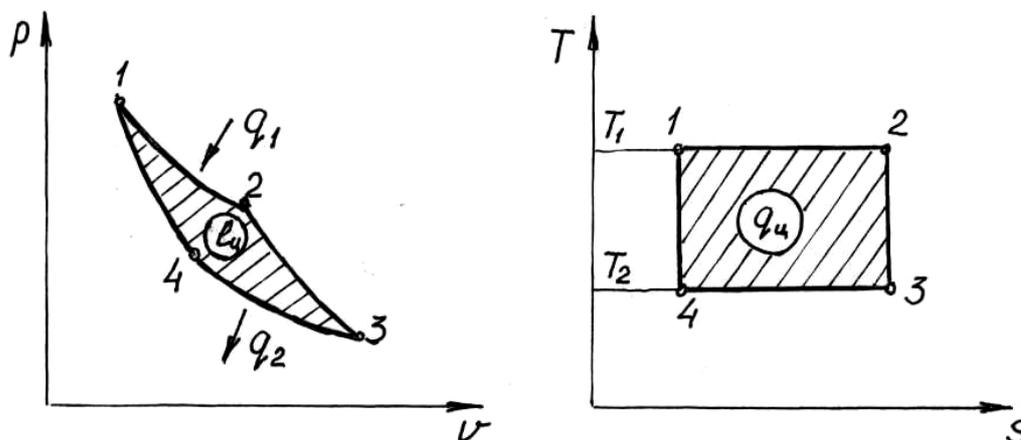


Рис. 1.6. Цикл Карно в $p - v$ и $T - s$ координатах.

- 1-2 – изотермическое расширение (подвод теплоты);
- 2-3 – адиабатное расширение;
- 3-4 – изотермическое сжатие (отвод теплоты);
- 4-1 – адиабатное сжатие.

Цикл Карно имеет наивысший термический КПД из всех циклов тепловых двигателей в заданном интервале температур. Его значение не зависит от количества подведенной теплоты в цикле, а определяется только температурами горячего и холодного источников.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где

T_1 – температура горячего источника, K ;

T_2 – температура холодного источника, K .

Какие идеальные циклы поршневых ДВС рассматриваются в термодинамике?

В термодинамике рассматриваются следующие циклы поршневых ДВС:

- цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто);
- цикл с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля);
- цикл с изохорно-изобарным подводом теплоты (цикл Тринклера).

Что собой представляет цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто)?

Цикл Отто представлен на рисунке 1.7.

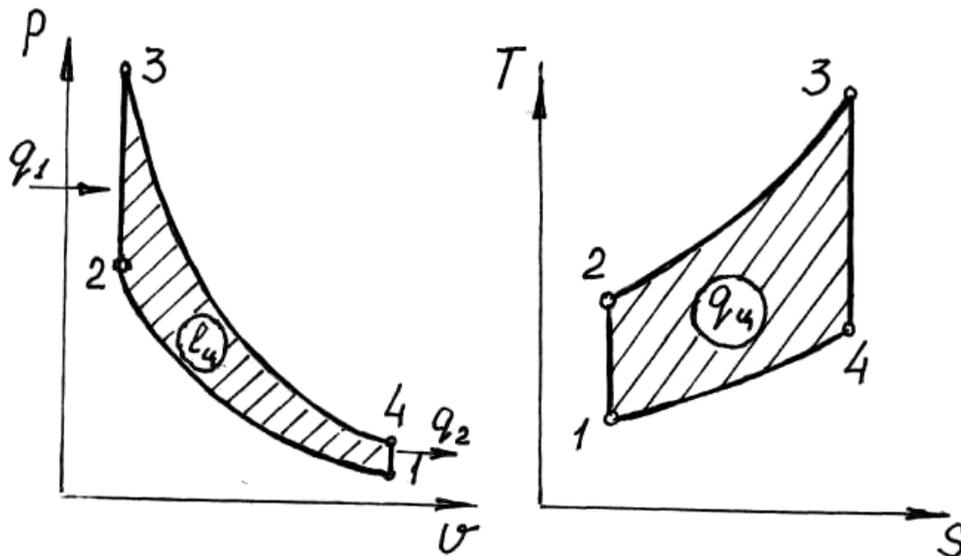


Рис. 1.7. Цикл с изохорным подводом теплоты в координатах $p - v$ и $T - s$.

- 1-2 – адиабатное сжатие;
- 2-3 – изохорный подвод теплоты;
- 3-4 – адиабатное расширение;
- 4-1 – изохорный отвод теплоты.

Параметрами, характеризующими цикл, являются

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \text{ – степень сжатия;}$$

$$\lambda_p = \frac{p_3}{p_2} \text{ – степень повышения давления;}$$

η_t – термический КПД цикла, характеризующий эффективность преобразования теплоты в работу;

$$p_t = \frac{l_u}{V_1 - V_2} = \frac{l_u}{V_h} \text{ – среднее давление цикла, являющееся энергетическим показателем цикла.}$$

Здесь величина V_h - рабочий объем цилиндра.

Что собой представляет цикл с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля)?

Цикл Дизеля представлен на рисунке 1.8.

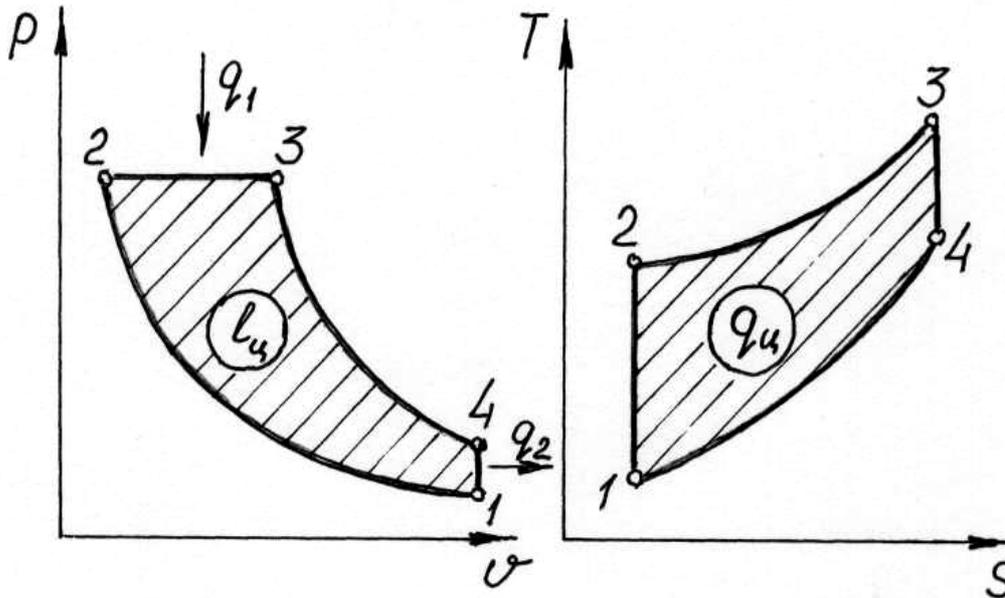


Рисунок 1.8. Цикл с изобарным подводом теплоты в координатах $p - v$ и $T - s$.

- 1-2 – адиабатное сжатие;
- 2-3 – изобарный подвод теплоты;
- 3-4 – адиабатное расширение;
- 4-1 – изохорный отвод теплоты.

Кроме общих для любого цикла параметров η_t и p_t , характеризующими цикл, параметрами также являются:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} - \text{степень сжатия};$$

$$\rho = \frac{V_3}{V_2} - \text{степень предварительного расширения}.$$

Степень предварительного расширения, как и степень повышения давления в цикле Отто зависит от количества подведенной в цикле теплоты.

Что собой представляет цикл с изохорно-изобарным подводом теплоты (цикл Тринклера) ?

Цикл Тринклера представлен на рисунке 1.9.

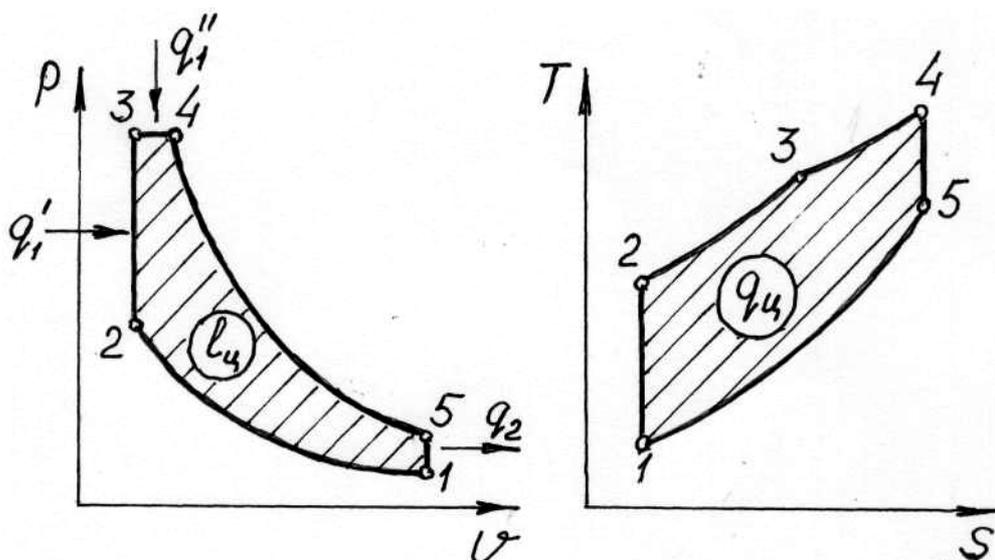


Рисунок 1.9. Цикл с изохорно-изобарным подводом теплоты в координатах $p - v$ и $T - s$.

- 1-2 – адиабатное сжатие;
- 2-3 – изохорный подвод теплоты;
- 3-4 – изобарный подвод теплоты;
- 4-5 – адиабатное расширение;
- 5-1 – изохорный отвод теплоты.

Параметрами цикла являются:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \text{ – степень сжатия;}$$

$$\lambda_p = \frac{p_3}{p_2} \text{ – степень повышения давления;}$$

$$\rho = \frac{V_4}{V_3} \text{ – степень предварительного расширения;}$$

$$\delta = \frac{V_5}{V_4} = \frac{\varepsilon}{\rho} \text{ - степень последующего расширения.}$$

Как рассчитывается термический КПД идеальных циклов поршневых ДВС?

Для цикла с изохорным подводом теплоты (цикла Отто) –

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} .$$

Для цикла с изобарным подводом теплоты (цикла Дизеля) –

$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} k(\rho - 1)} .$$

Для цикла с изохорно-изобарным подводом теплоты (цикла Тринклера) –

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda_p \rho^k - 1}{\varepsilon^{k-1} (\lambda_p - 1 + k\lambda_p (\rho - 1))} .$$

Как рассчитывается среднее давление идеальных циклов поршневых ДВС?

Для цикла с изохорным подводом теплоты (цикла Отто) –

$$p_t = \frac{p_1 \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon-1)} (\lambda_p - 1) \eta_t .$$

Для цикла с изобарным подводом теплоты (цикла Дизеля) –

$$p_t = \frac{p_1 \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon-1)} k(\rho - 1) \eta_t .$$

Для цикла с изохорно-изобарным подводом теплоты (цикла Тринклера) –

$$p_t = \frac{p_1 \varepsilon^k}{(k-1)(\varepsilon-1)} (\lambda_p - 1 + k\lambda_p (\rho - 1)) \eta_t .$$

Какова сравнительная эффективность трех выше рассмотренных циклов?

Наибольшее влияние на термический КПД циклов оказывает степень сжатия, поэтому дизели, в которых обеспечивается более высокая степень сжатия, более экономичны. При одинаковых степенях сжатия наибольший КПД имеет цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто), наименьший – цикл с изобарным подводом (цикл Дизеля). При одинаковых же максимальных давлениях термический КПД цикла Отто меньше, чем КПД цикла Дизеля. Цикл Тринклера занимает промежуточное положение. При этом КПД этого цикла увеличивается с уменьшением доли теплоты, подводимой в изобарном процессе (то есть с уменьшением ρ).

В чем принципиальное отличие принципа действия и циклов газотурбинных установок (ГТУ) от циклов поршневых ДВС?

В ГТУ, принципиальная схема которой представлена на рис.1.10, в отличие от поршневых ДВС используется не работа расширения газов, а кинетическая энергия потока газов, направляемых из камеры сгорания на лопатки турбинного колеса.

Различают циклы ГТУ с подводом теплоты в изобарном и в изохорном процессах.

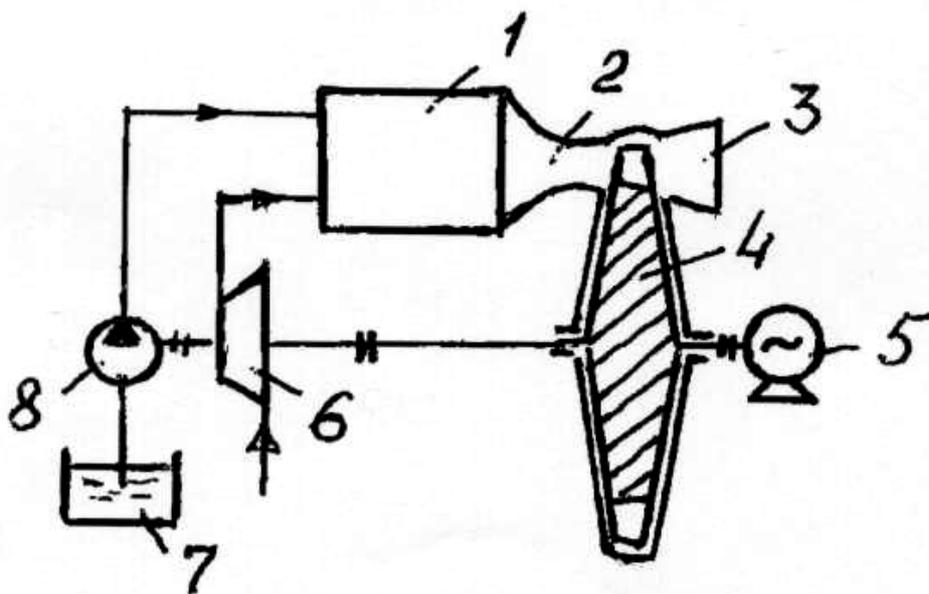


Рис. 1.10. Принципиальная схема ГТУ.

- 1 – камера сгорания; 2 – сопловой аппарат; 3 – выхлопной патрубок;
- 4 – турбинное колесо; 5 – нагрузка; 6 – компрессор; 7 – топливный бак;
- 8 – топливный насос.

Что представляет собой цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты?

Теоретический цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты представлен на рис. 1.11.

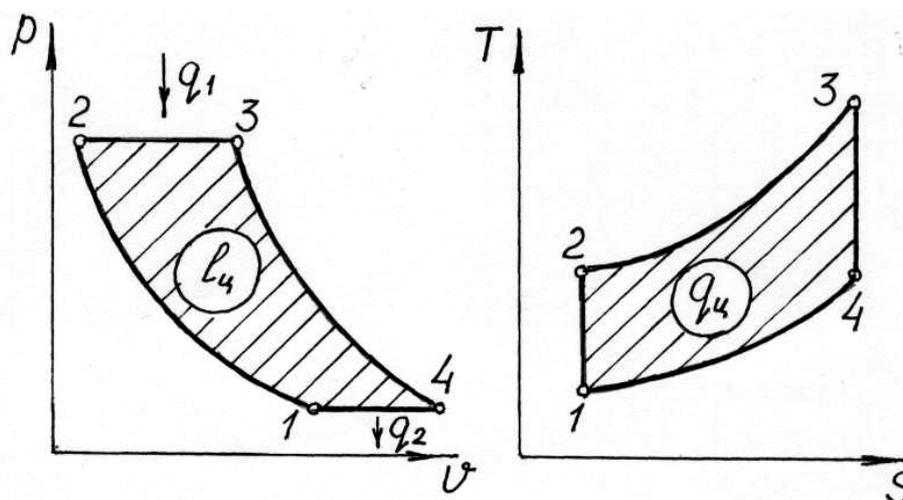


Рисунок 1.11. Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты в координатах $p - v$ и $T - s$.

- 1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре;
- 2-3 – изобарный процесс подвода теплоты в камере сгорания;
- 3-4 – адиабатное расширение рабочего тела в турбине;
- 4-1 – изобарный процесс отвода теплоты.

Параметрами цикла являются:

$$\varepsilon_k = \frac{v_1}{v_2} - \text{степень сжатия в компрессоре};$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} - \text{степень повышения давления в компрессоре};$$

$$\rho = \frac{v_3}{v_4} - \text{степень предварительного расширения}.$$

Термический КПД цикла можно рассчитать по формулам:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon_k^{k-1}} \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}.$$

Что представляет собой цикл ГТУ с изохорным подводом теплоты?

Теоретический цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты представлен на рис. 1.12.

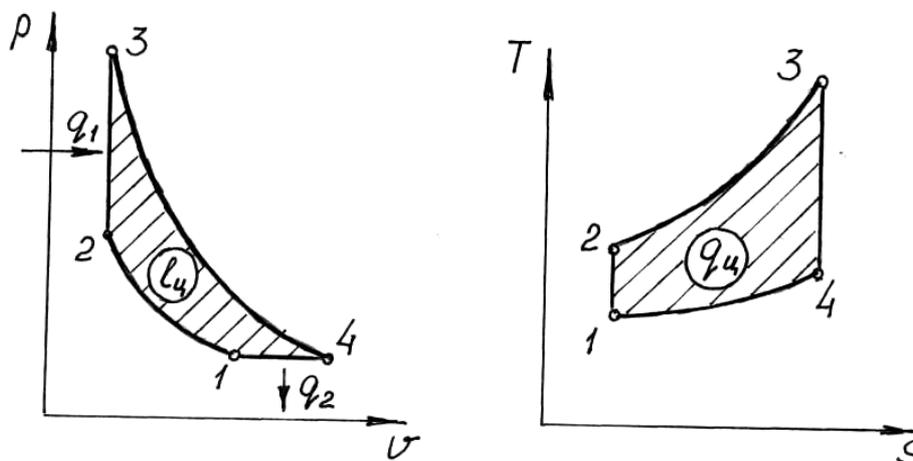


Рисунок 1.12. Цикл ГТУ с изохорным подводом теплоты в координатах $p - v$ и $T - s$.

- 1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре;
- 2-3 – изохорный процесс подвода теплоты в камере сгорания;
- 3-4 – адиабатное расширение рабочего тела в турбине;
- 4-1 – изобарный процесс отвода теплоты.

Параметрами цикла являются:

$$\varepsilon_{\kappa} = \frac{v_1}{v_2} - \text{степень сжатия в компрессоре};$$

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} - \text{степень повышения давления в компрессоре};$$

$$\lambda_p = \frac{p_3}{p_2} - \text{степень повышения давления в изохорном процессе}.$$

Термический КПД цикла можно рассчитать по формулам:

$$\eta_t = 1 - \frac{k}{\varepsilon_{\kappa}^{k-1}} \cdot \frac{\lambda_p^{\frac{1}{k}} - 1}{\lambda_p - 1} \quad \text{или} \quad \eta_t = 1 - \frac{k(\lambda_p^{\frac{1}{k}} - 1)}{\beta^{\frac{k-1}{k}} (\lambda_p - 1)}.$$

Следует отметить, что цикл с изохорным подводом теплоты не получил широкого распространения из-за более сложной конструкции ГТУ.

1.12. Термодинамические основы работы компрессора

Что собой представляет компрессор?

Компрессор – машина для сжатия и перемещения газов. По принципу действия различают объемные компрессоры или статического сжатия, к которым относятся поршневые и ротационные, и динамического сжатия – лопастные. Кроме того, они могут быть одноступенчатые и многоступенчатые. С точки зрения термодинамики процессы, протекающие в различных компрессорах одинаковы, поэтому их можно рассмотреть на примере поршневого компрессора.

Что собой представляет цикл работы одноступенчатого поршневого компрессора?

Графически цикл работы поршневого компрессора можно представить в виде индикаторной диаграммы в координатах p - V .

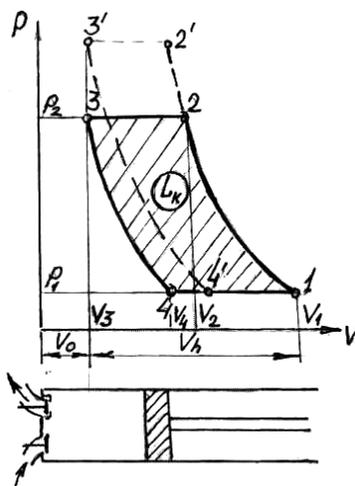


Рис.1.13. Теоретическая индикаторная диаграмма работы компрессора.

- 1-2 – процесс сжатия;
- 2-3 – процесс выталкивания (нагнетания);
- 3-4 – процесс расширения газа, оставшегося в мертвом объеме V_0 (вредном пространстве);
- 4-1 - процесс всасывания (впуска).

Мертвым объемом V_0 называется объем между крышкой цилиндра и поршнем в верхней мертвой точке (ВМТ).

Разность между полным объемом цилиндра V_1 и мертвым объемом V_0 называется рабочим объемом цилиндра V_h .

Основными параметрами цикла компрессора являются:

$\beta = \frac{p_2}{p_1}$ - степень повышения давления в компрессоре;

$\varepsilon_k = \frac{V_1}{V_2}$ - степень сжатия в компрессоре.

Что собой представляет объемный КПД компрессора?

Объемный КПД компрессора $\eta_{об}$ учитывает уменьшение всасываемой порции газа в рабочий объем цилиндра из-за расширения газа, оставшегося в мертвом объеме.

$$\eta_{об} = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_0} = \frac{V_1 - V_4}{V_h} .$$

Объемный КПД компрессора уменьшается с увеличением мертвого объема и степени повышения давления в компрессоре.

Что собой представляет идеальный компрессор?

Идеальным называют компрессор, у которого $V_0 = 0$ и отсутствуют потери в клапанной системе. Ниже представлена индикаторная диаграмма идеального компрессора и процесс сжатия в координатах $T-s$.

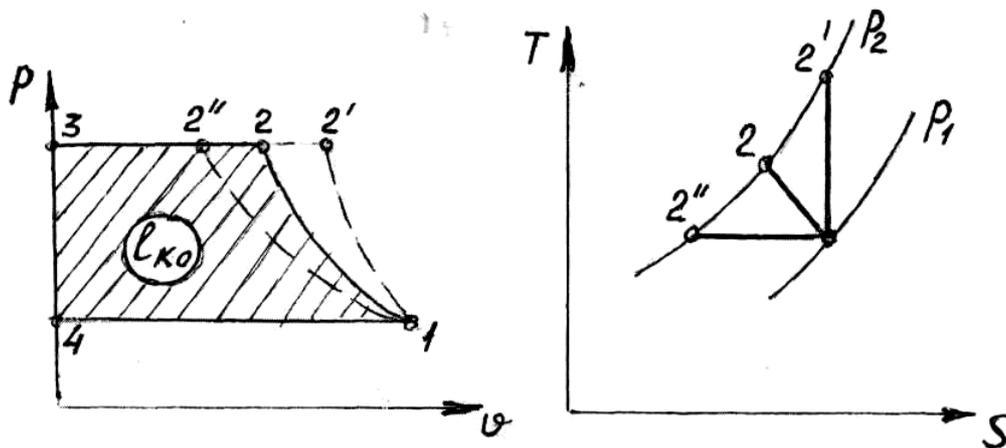


Рис. 1.14. Индикаторная диаграмма идеального компрессора и процесс сжатия в координатах $T-s$.

- 1-2 – процесс политропного сжатия;
- 1-2' – процесс адиабатного сжатия;
- 1-2'' – процесс изотермического сжатия.

Как определяется удельная работа за цикл в идеальном компрессоре?

Работа, за цикл в идеальном компрессоре, складывается из работы, затрачиваемой на процессы сжатия и выталкивания газа, за вычетом работы впуска (всасывания)

$$l_{ок} = l_{сж} + l_{выт} - l_{вс}.$$

Работа выталкивания в соответствии с рис. 1.14 равна

$$l_{выт} = p_2 \cdot v_2.$$

Работа всасывания –

$$l_{вс} = p_1 \cdot v_1.$$

Работа, затрачиваемая на процесс сжатия, зависит от характера процесса и составляет:

$$l_{сж} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{– при изотермическом сжатии;}$$

$$l_{сж} = \frac{1}{k-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad \text{– при адиабатном сжатии;}$$

$$l_{сж} = \frac{1}{n-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad \text{– при политропном сжатии.}$$

В итоге, удельная работа, затрачиваемая за цикл в идеальном компрессоре, составляет:

$$l_{ок} = p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1} \quad \text{– при изотермическом сжатии;}$$

$$l_{ок} = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{– при адиабатном сжатии;}$$

$$l_{ок} = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] - \text{при политропном сжатии.}$$

С какой целью применяется многоступенчатое сжатие в компрессоре?

Многоступенчатое сжатие используется для получения высоких давлений, которые не могут быть достигнуты при одноступенчатом сжатии (обычно для одной ступени $\beta \leq 10$). При многоступенчатом сжатии повышается объемный КПД, и, при наличии промежуточного охлаждения между ступенями, снижается работа на сжатие газа и максимальная температура газа.

Как определяется производительность реального компрессора?

Массовая производительность компрессора m_k (кг/ч) может быть найдена по формуле

$$m_k = \rho_0 V_h \varepsilon_n n \cdot 60 ,$$

где

ρ_0 – плотность всасываемого газа, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

V_h – рабочий объем компрессора, м^3 ;

ε_n – коэффициент подачи;

n – частота вращения вала компрессора, об/мин.

В свою очередь

$$\varepsilon_n = \eta_{об} \varepsilon_{др} \varepsilon_t \varepsilon_{ут} ,$$

где

$\eta_{об}$ – объемный КПД;

$\varepsilon_{др}$ – коэффициент, учитывающий потери на дросселирование;

ε_t – коэффициент, учитывающий потери от подогрева на впуске;

$\varepsilon_{ут}$ – коэффициент, учитывающий потери из-за утечек через неплотности.

Как определяется мощность на привод компрессора?

Требуемая мощность N_k (кВт) на привод компрессора рассчитывается по формуле

$$N_k = \frac{L_{ок}}{\eta_k \cdot 3,6 \cdot 10^6},$$

где

$L_{ок}$ – теоретическая работа, затрачиваемая идеальным компрессором на сжатие m_k кг/ч газа, Дж;

η_k – КПД компрессора, учитывающий механические потери на трение и потери в клапанном механизме и увеличение удельной работы в цикле реального компрессора по сравнению с идеальным.

1.13. Термодинамические свойства реальных газов

Что такое агрегатное состояние вещества и фазовые переходы?

Химически чистые вещества в зависимости от условий могут существовать в одном из трех агрегатных состояний (фаз) – газообразном, жидком и твердом. Переход вещества из одной фазы (агрегатного состояния) в другую называется фазовым переходом. Фазовый переход обычно связан с подводом или отводом теплоты.

Что собой представляет правило фаз Гиббса?

Правило фаз Гиббса устанавливает для термодинамической системы, находящейся в равновесии, связь между числом степеней свободы (независимых переменных), числом фаз и числом компонентов системы и выражается в форме

$$\psi = n - r + 2,$$

где

ψ – число степеней свободы;

n – число компонентов;

r – число фаз в системе.

Что собой представляет диаграмма фазовых переходов?

На диаграмме фазовых переходов в координатах $p - T$ изображены линии фазовых переходов. Диаграмма позволяет установить, в каком агрегатном состоянии в зависимости от температуры и давления находится вещество.

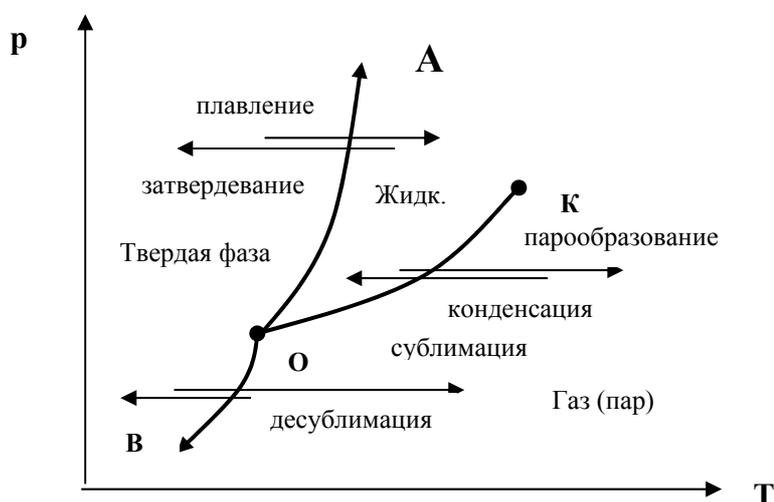


Рис. 1.15. Диаграмма фазовых переходов.

O – тройная точка; K – критическая точка; OK – кривая кипения (конденсации);

OA – кривая плавления (затвердевания); OB – кривая сублимации (десублимации).

Что такое тройная точка?

Тройной точкой называется состояние вещества, при котором в термодинамическом равновесии находятся все три фазы.

Что собой представляет критическая точка?

Критическая точка является конечной на линии парообразования (конденсации) и соответствует температуре, выше которой вещество может находиться только в газовой фазе (см. диаграмму фазовых переходов).

Что такое сублимация?

Сублимация – процесс перехода вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкую фазу.

В каких случаях для реальных газов нельзя пользоваться уравнением состояния для идеальных газов (уравнением Клапейрона - Менделеева)?

По мере приближения реального газа к состоянию жидкости (при повышенных давлениях и при снижении температуры) уменьшаются рас-

стояния между молекулами, и все в большей степени проявляются силы взаимодействия между ними, вследствие чего поведение реального газа все больше отклоняется от поведения идеального.

Что собой представляет уравнение Ван-дер-Ваальса?

Уравнение Ван-дер-Ваальса качественно верно отражает поведение реальных газов, отличаясь при этом достаточной простотой. Для одного кг газа оно имеет вид

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = RT ,$$

где

a и b – величины, постоянные для данного газа, определяемые экспериментально.

В приведенном уравнении поправка $\frac{a}{v^2}$ учитывает влияние сил взаимодействия между молекулами, а b представляет собой поправку на объем молекул. Значения a и b можно найти и по формулам:

$$a = 3v_K^2 p_K \quad ; \quad b = \frac{v_K}{3} ,$$

где v_K и p_K – параметры состояния критической точки.

Следует отметить, что существуют более сложные уравнения, которые полнее учитывают свойства реальных газов.

1.14. Водяной пар

Чем отличается процесс испарения от процесса парообразования?

Испарение происходит с поверхности жидкости, а парообразование осуществляется по всему объему жидкости и происходит при ее кипении.

Какие существуют виды пара и чем они отличаются?

Различают сухой насыщенный, перегретый и влажный пар.

Сухой насыщенный пар представляет собой пар, в котором отсутствует жидкая фаза, а его температура равна температуре кипения (насыщения) для данного давления.

Перегретый пар – это сухой пар, температура которого выше температуры кипения для данного давления.

Влажный пар представляет собой смесь сухого насыщенного пара и влаги (жидкой фазы).

Что такое степень сухости влажного пара?

Степенью сухости x влажного пара называется массовая доля сухого насыщенного пара во влажном. То есть

$$x = \frac{m_n}{m_n + m_{жс}}$$

где

m_n – масса сухого насыщенного пара в смеси;

$m_{жс}$ – масса влаги (жидкой фазы) в смеси.

Что такое теплота парообразования?

Теплотой парообразования r называют количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг жидкости, нагретой до температуры кипения, в сухой насыщенный пар при постоянном давлении.

Как зависит от давления температура кипения (насыщения) и теплота парообразования?

При увеличении давления температура кипения растет, а теплота парообразования уменьшается.

Как изображается процесс парообразования при постоянном давлении на диаграммах $p - v$ и $T - s$?

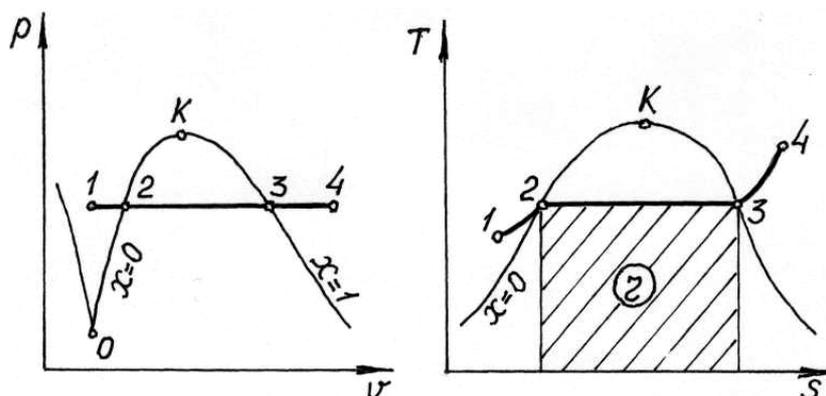


Рис. 1.16. Процесс парообразования в координатах $p - v$ и $T - s$.

- 1 – 2 – процесс нагрева воды до температуры кипения;
- 2 – 3 – процесс парообразования;
- 3 – 4 – процесс перегрева пара.

Как рассчитывается удельная энтальпия конденсата?

Удельную энтальпию конденсата при отсчете от условного нуля ($t = 0^{\circ}C$) можно найти по формуле

$$i = c_6 t,$$

где

c_6 – удельная массовая теплоемкость воды;

t – температура конденсата (воды).

В частности, энтальпия кипящей воды

$$i' = c_6 t_n,$$

где

t_n – температура кипения (насыщения).

Как рассчитывается удельная энтальпия сухого насыщенного пара?

Удельная энтальпия сухого насыщенного пара находится по формуле

$$i'' = i' + r,$$

где

i' – удельная энтальпия кипящей воды;

r – теплота парообразования.

Как рассчитывается удельная энтальпия влажного пара?

Удельная энтальпия влажного пара находится по формуле

$$i_x = i' + xr,$$

где

x – степень сухости влажного пара.

Как рассчитывается удельная энтальпия перегретого пара?

Удельная энтальпия перегретого пара находится по формуле

$$i_n = i'' + c_{pn}(t - t_n),$$

где

i'' – удельная энтальпия сухого насыщенного пара;

t – температура перегретого пара;

t_n – температура насыщения (кипения);

c_{pn} – удельная массовая изобарная теплоемкость пара.

При этом следует учитывать, что теплоемкость перегретого пара зависит не только от температуры, но и в существенной степени от давления.

Какова структура диаграммы $i-s$ водяного пара и как на ней изображаются основные паровые процессы?

Диаграмма $i-s$ довольно широко используется в инженерных расчетах, когда рабочим телом является водяной пар. На диаграмме пограничными кривыми выделена область влажного пара, выше которой лежит область перегретого пара. На диаграмме представлено семейство изобар (линий постоянного давления), изохор (линий постоянного удельного объема), изотерм (линий постоянных температур) в области перегретого пара и линий постоянной степени сухости в области влажного пара. При определении температуры влажного пара по диаграмме необходимо помнить, что в области влажного пара каждая изобара одновременно является изотермой и, следовательно, значение температуры можно определить по точке пересечения соответствующей изобары с верхней пограничной кривой.

Ниже на рисунке представлена структура диаграммы $i-s$ пара и изображены основные паровые процессы.

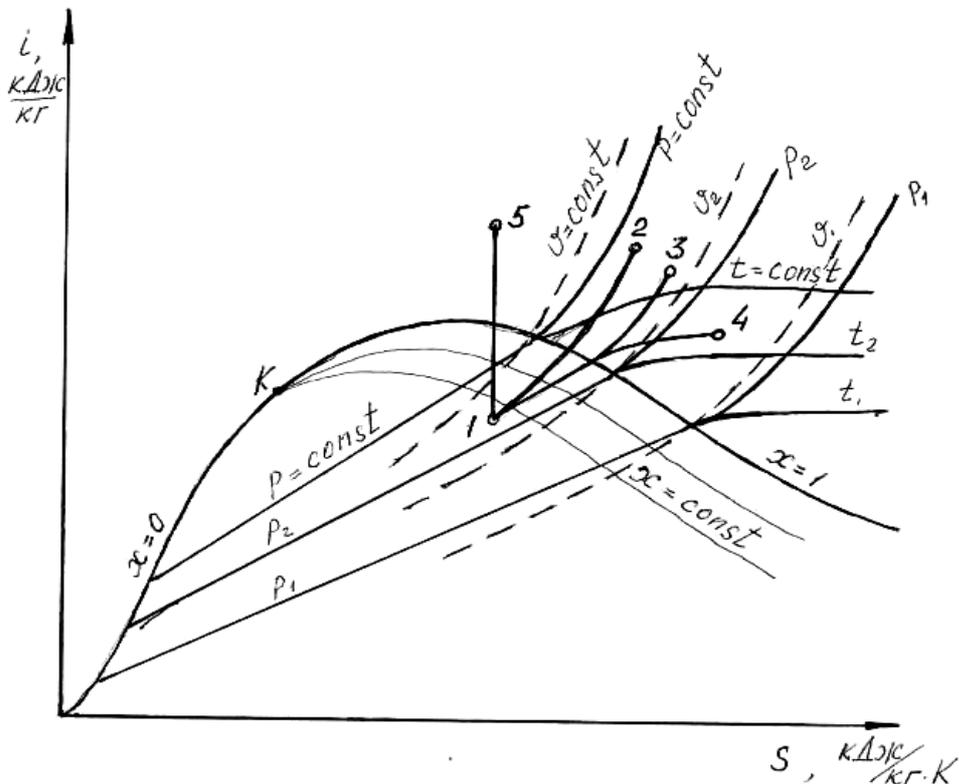


Рис.1.17. Диаграмма $i-s$ пара.

- 1-2 – изохорный процесс;
- 1-3 – изобарный процесс;
- 1-4 – изотермический процесс;
- 1-5 – адиабатный процесс.

Как, пользуясь диаграммой $i-s$, можно определить удельную внутреннюю энергию пара?

Для определения удельной внутренней энергии пара по диаграмме $i-s$ пара необходимо для точки, соответствующей состоянию пара, найти значение удельной энтальпии, давление и удельный объем пара и рассчитать удельную внутреннюю энергию по формуле

$$u = i - p\nu.$$

1.15. Влажный воздух

Что называют влажным воздухом?

Влажным воздухом называют смесь сухого воздуха (всех компонентов, входящих в воздух, за исключением водяного пара) и водяного пара.

Что называют насыщенным воздухом?

Насыщенным называют воздух, в котором содержащийся в нем пар является сухим насыщенным. Насыщенный воздух содержит максимальное количество водяного пара для данной температуры и давления и имеет относительную влажность $\varphi = 100\%$.

Что называют ненасыщенным воздухом?

Ненасыщенным называют воздух, в котором содержащийся в нем пар является перегретым. Относительная влажность ненасыщенного воздуха менее 100%.

Что такое абсолютная влажность воздуха?

Абсолютной влажностью ρ_n называется масса пара, содержащаяся в 1 м^3 влажного воздуха. Абсолютная влажность имеет размерность плотности и равна плотности пара при его парциальном давлении и температуре влажного воздуха.

Что называется относительной влажностью и как она находится?

Относительной влажностью φ называется отношение действительной абсолютной влажности ρ_n к максимально возможной абсолютной влажности воздуха ρ_{nn} для данной температуры. Обычно относительная влажность находится в %.

Учитывая, что абсолютная влажность (плотность пара) пропорциональна парциальному давлению пара в воздухе, ее значение может быть найдено по формуле

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{nn}} 100 = \frac{P_n}{P_{nn}} 100, \%$$

Здесь p_n – парциальное давление пара в воздухе, а p_{nn} – давление насыщения пара для данной температуры (парциальное давление пара в насыщенном воздухе).

Для измерения относительной влажности используется психрометр – прибор, состоящий из двух термометров, один из которых сухой, а другой – смоченный. Показания "мокрого" термометра в ненасыщенном воздухе будут ниже, так как с него будет происходить испарение, которое сопровождается поглощением теплоты. Чем меньше относительная влажность воздуха, тем больше разница показаний "сухого" и "мокрого" термометров.

Что называется влагосодержанием и как оно находится?

Влагосодержанием d называется масса пара, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха. Обычно влагосодержание имеет размерность – г / кг с. в.

Влагосодержание можно рассчитать по формуле

$$d = 622 \frac{p_n}{p - p_n},$$

где

p_n – парциальное давление пара;

p – давление влажного воздуха.

Что называется влагоемкостью?

Влагоемкостью d_{\max} называется максимальное для данной температуры влагосодержание, то есть влагосодержание насыщенного воздуха.

Что называется точкой росы?

Точкой росы называется температура, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным, то есть до достижения относительной влажности 100%.

При дальнейшем снижении температуры, содержащийся в воздухе водяной пар начинает конденсироваться, и этот конденсат выделяется из воздуха в виде росы или тумана.

Как можно понизить влагосодержание воздуха?

Для снижения влагосодержания воздуха необходимо понизить температуру воздуха ниже точки росы. При этом часть водяного пара, содержащегося в воздухе сконденсируется и выпадет из воздуха в виде росы или тумана.

Как рассчитывается удельная энтальпия влажного воздуха?

Удельная энтальпия i влажного воздуха рассчитывается на 1 кг сухого воздуха

$$i = i_{c.в.} + 0,001d \cdot i_n ,$$

где

$i_{c.в.}$ – удельная энтальпия сухого воздуха;

d – влагосодержание воздуха, г /кг с. в. ;

i_n – удельная энтальпия пара, содержащегося в воздухе.

Учитывая, что удельная энтальпия сухого воздуха – $i_{c.в.} = c_{pв} t = t$ (здесь $c_{pв} \approx 1,0$ кДж/кг – удельная массовая изобарная теплоемкость воздуха, а t – температура воздуха, $^{\circ}C$), и удельная энтальпия пара – $i_n = 2501 + 1,93 \cdot t$ кДж/кг, то удельная энтальпия i влажного воздуха может быть рассчитана по формуле

$$i = t + 0,001d(2501 + 1,93 \cdot t) , \text{ кДж/ кг с. в.}$$

Что собой представляет диаграмма $i - d$ влажного воздуха?

Диаграмма $i - d$ влажного воздуха позволяет довольно просто определять параметры влажного воздуха. Особенностью диаграммы является то, что она построена в системе координат с углом между осями 135° , поэтому линии постоянной энтальпии на диаграмме располагаются под углом 45° . На диаграмме проведено семейство линий постоянной относительной влажности φ , а также изотермы, соответствующие показаниям сухого и мокрого термометров. В нижней части диаграммы расположена линия зависимости парциального давления от влагосодержания (ось парциального давления помещается справа).

Структура диаграммы $i - d$ влажного воздуха приведена на рисунке ниже. На диаграмме представлены также процессы нагрева воздуха и увлажнения при отсутствии потерь теплоты (процесс сушки в идеальной сушилке).

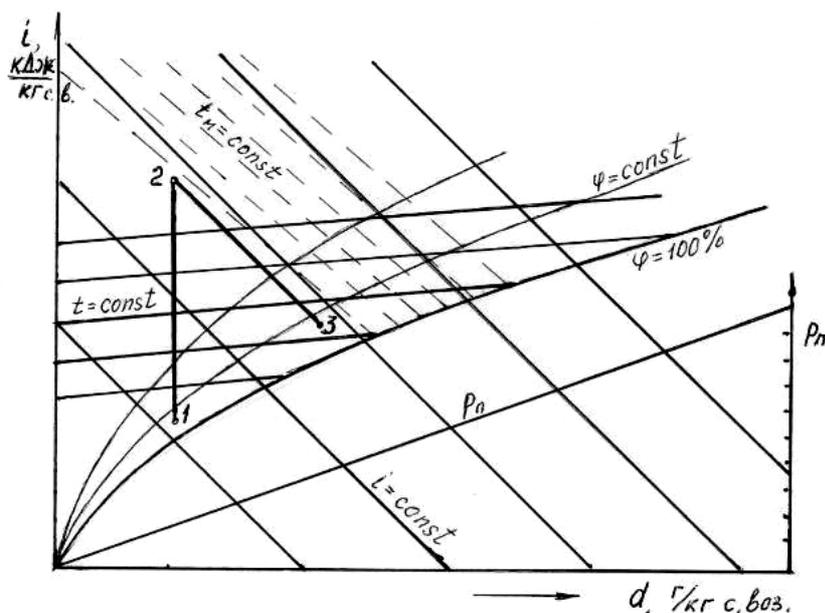


Рис.1.18. Диаграмма $i-d$ влажного воздуха.
1-2 – процесс нагрева; 2-3 – процесс увлажнения

1.16. Истечение газов и паров

В каких случаях в технике используются процессы истечения газов или паров?

На практике часто приходится иметь дело с устройствами, работа которых связана с движением рабочего тела. Чаще всего это движение осуществляется в виде течения газов или паров по каналам. При этом во многих случаях кинетическая энергия потока используется для совершения полезной работы (паровые и газовые турбины, реактивные двигатели, ракеты и др.).

Течение может происходить как по каналам (трубам) постоянного сечения, так и в специальных каналах переменного сечения, называемых соплами и диффузорами. Канал, в котором с уменьшением давления скорость потока возрастает, называют соплом, а канал, в котором по потоку скорость уменьшается, а давление растет, называют диффузором.

Как формулируется первый закон термодинамики для потока газа?

Первый закон термодинамики для потока газа можно сформулировать следующим образом.

Теплота, подводимая к потоку газа, идет на изменение его внутренней энергии, совершение работы по проталкиванию газа по каналу и на приращение внешней кинетической энергии газа.

Математическая запись первого закона термодинамики для потока в дифференциальной форме имеет вид:

$$dq = du + dl' + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right),$$

где

dq – элементарное количество удельной теплоты;

du – приращение удельной внутренней энергии газа;

dl' – элементарная удельная работа проталкивания;

$d\left(\frac{\omega^2}{2}\right)$ – приращение внешней кинетической энергии потока;

ω – скорость потока.

Что собой представляет работа проталкивания?

Работа проталкивания представляет собой работу против внешних сил при перемещении газа по каналу (она не равна работе расширения). Элементарная работа проталкивания находится по выражению

$$dl' = d(pv).$$

Что такое располагаемая работа?

Располагаемой работой называют приращение кинетической энергии потока, поскольку приобретенный запас кинетической энергии потока и используется во многих технических устройствах для совершения полезной работы.

Таким образом, элементарная удельная располагаемая работа равна

$$dl_0 = d\left(\frac{\omega^2}{2}\right).$$

Соответственно,

$$l_0 = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2}.$$

Как выражается элементарная располагаемая работа через параметры состояния газа?

Из сопоставления приведенного выше выражения первого закона термодинамики для потока с выражением первого закона термодинамики для закрытых систем следует:

$$dl = dl' + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) = dl' + dl_0.$$

Учитывая, что работа расширения $dl = pdv$, а работа проталкивания $dl' = d(pv) = vdp + pdv$, получаем

$$dl_0 = pdv - d(pv) = -vdp.$$

Как связаны между собой скорость и давление в потоке?

Из выражения $dl_0 = d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) = -vdp$ следует

$$\omega \cdot d\omega = -vdp.$$

Таким образом, скорость увеличивается при снижении давления, а при снижении скорости потока давление повышается.

Как выглядит выражение первого закона термодинамики для потока через энтальпию?

Выражение первого закона термодинамики для потока через энтальпию получают из приведенного выше выражения первого закона термодинамики для потока с учетом того, что $dl' = d(pv)$. В результате имеем

$$dq = di + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right).$$

Таким образом, первый закон термодинамики для потока можно сформулировать следующим образом.

Теплота, сообщаемая потоку газа, идет на увеличение его энтальпии и приращение внешней кинетической энергии.

Как выглядит выражение первого закона термодинамики для потока при совершении им полезной технической работы?

Выражение первого закона термодинамики для потока при совершении им полезной технической работы имеет вид:

$$dq = du + dl' + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) + dl_m, \quad \text{или}$$

$$dq = di + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) + dl_m.$$

Здесь dl_m – элементарная техническая работа. Техническая работа обычно связана с перемещением канала, по которому движется поток.

Как определяется располагаемая работа при адиабатном течении?

При течении газа по коротким каналам с высокой скоростью теплообменом с окружающей средой можно пренебречь и считать процесс адиабатным. Выражение первого закона термодинамики для потока в этом случае приобретает вид:

$$0 = di + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) = di + dl_0.$$

Отсюда –

$$dl_0 = d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) = -di.$$

Соответственно, располагаемая работа

$$l_0 = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} = i_1 - i_2.$$

Здесь ω_1 и ω_2 , i_1 и i_2 – скорость и энтальпия газа соответственно в первом и втором сечении потока.

Располагаемую работу можно выразить через работу расширения l и параметры состояния. Учитывая, что $dl_0 = -vdp$, располагаемая работа –

$l_0 = \int_{p_2}^{p_1} vdp$. При адиабатном истечении $l_0 = k \cdot l$. Действительно, (см. рис 1.18).

$$l_0 = \int_{p_2}^{p_1} v dp = l + p_1 v_1 - p_2 v_2 = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) + (p_1 v_1 - p_2 v_2) =$$

$$= \frac{k}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = k \cdot l$$

Это выражение можно представить в виде

$$l_0 = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

где

p_1 и v_1 – соответственно, давление и удельный объём на входе в сопло;

p_2 – давление на выходе из сопла.

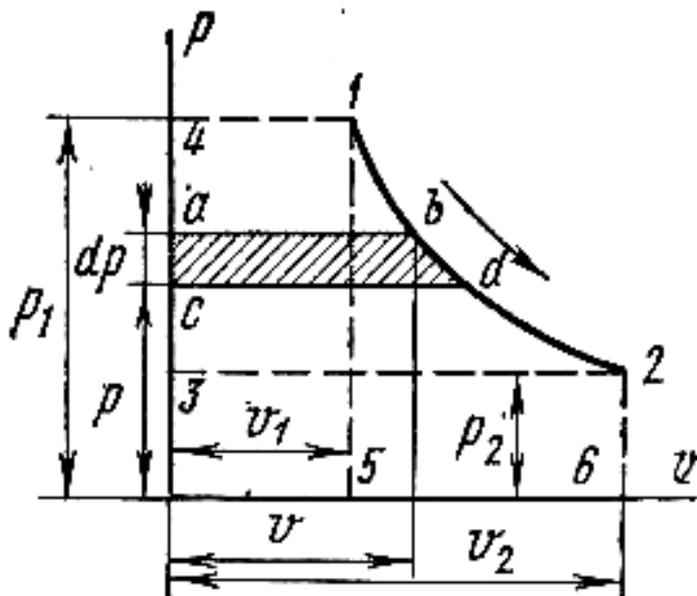


Рис. 1.18. К определению располагаемой работы.

Как определяется скорость потока при истечении газа через суживающийся канал (сопло)?

При истечении газа по короткому каналу даже при небольшом перепаде давления скорость течения приобретает большую величину, поэтому теплообменом за время прохождения газом канала можно пренебречь и считать процесс адиабатным. В этом случае на основании первого закона термодинамики можем записать

$$dl_0 = d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) = -di \quad \text{и} \quad l_0 = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{2} = i_1 - i_2.$$

Отсюда – скорость потока на выходе из сопла

$$\omega_2 = \sqrt{\omega_1^2 + 2(i_1 - i_2)} = \sqrt{\omega_1^2 + 2l_0}.$$

Во многих случаях (как, например, при истечении из большой емкости) начальная скорость ω_1 весьма мала по сравнению с конечной ω_2 и ее значением можно пренебречь. Тогда скорость истечения из сопла

$$\omega_2 = \omega = \sqrt{2(i_1 - i_2)} = \sqrt{2l_0} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}.$$

Как следует из этого выражения, скорость истечения зависит от параметров состояния на входе в сопло и от отношения давлений на его входе и выходе.

Как определяется расход газа при истечении из сопла?

Массовый расход газа при истечении из сопла можно найти, умножив скорость газа на площадь сечения A и плотность газа на выходе из сопла ρ_2 . Умножение на плотность можно заменить делением на удельный объем, который при адиабатном истечении равен

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

С учетом выражения для скорости истечения массовый расход через сопло составляет

$$m = A \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad \text{кг/с}.$$

При каком условии массовый расход газа через сопло имеет максимальное значение?

Исследование на экстремум приведенного выше выражения для массового расхода газа через сопло показывает, что расход достигает максимума при отношении

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{кр}}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Давление p_2 , соответствующее этому расходу, называют критическим $p_{кр}$. В частности, при показателе адиабаты $k = 1,4$ – $p_{кр} = 0,528 p_1$.

Скорость истечения в этом случае имеет максимальное значение и носит название критической. **Критическая скорость равна скорости звука в среде с параметрами $p_{кр}, v_{кр}$** . Практика показывает, что при дальнейшем снижении давления среды, куда происходит истечение расход газа остается постоянным.

Каково значение критической скорости?

Значение критической скорости можно рассчитать, подставив в выражение для скорости истечения критическое соотношение давлений. Расчетная формула в этом случае приобретает вид:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 v_1} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} R T_1} = \sqrt{k \cdot p_{кр} v_{кр}}.$$

Последнее выражение и представляет собой формулу Лапласа для расчета скорости звука в среде с параметрами $p_{кр}, v_{кр}$. То есть, критическая скорость равна скорости звука в среде с параметрами $p_{кр}, v_{кр}$.

Почему в суживающемся канале нельзя достичь скорости, превышающей критическую?

В суживающемся канале нельзя достичь скорости, превышающей критическую, потому что при истечении газа в среду с давлением меньше критического в выходном сечении сопла все равно давление устанавливается равным критическому. Это объясняется тем, что импульс давления распространяется в материальной среде со скоростью звука, поэтому при достижении скорости газа критической, то есть скорости звука, скорость

распространения давления и скорость движения газа сравниваются, и никакое уменьшение внешнего давления не может повлиять на распределение давления в сопле.

Можно ли при истечении достичь скорость, превышающую скорость звука?

Да, можно. Для этого сопло должно быть комбинированным: состоящим из короткой сужающейся и конической расширяющейся частей. Такое сопло было впервые предложено шведским инженером Лавалем. Сопло Лавала и картина истечения в нем представлены на рис.1.19. Сопло Лавала предназначено для использования больших перепадов давления и получения скоростей, превышающих скорость звука.

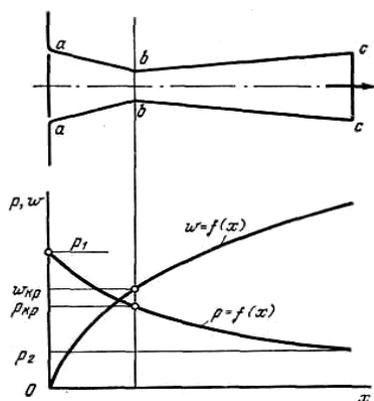


Рис.1.19. Сопло Лавала и истечение газа в сопле.

Что такое дросселирование?

Дросселирование – процесс снижения давления при прохождении газом (паром) местного сужения канала (местного сопротивления) без совершения внешней работы. Дросселирование является необратимым процессом. Обычно теплообменом с окружающей средой при дросселировании пренебрегают и считают процесс адиабатным.

Где используется процесс дросселирования?

Дросселирование широко используется в холодильных установках для снижения температуры рабочего тела (хладоагента), в установках для сжижения газов, для регулирования работы паросиловых установок, в расходомерных устройствах и в ряде других случаев.

Как изменяются параметры рабочего тела при дросселировании?

При адиабатном дросселировании энтальпия сохраняет свое значение, то есть $i_1 = i_2$. При этом дросселирование нельзя отождествлять с

изоэнтальпийным процессом, поскольку при непосредственном прохождении местного сопротивления энтальпия претерпевает изменения, но ее значение восстанавливается после дросселя. Давление в результате дросселирования снижается по определению, удельный объем возрастает, а температура может увеличиваться, уменьшаться или оставаться неизменной. Дросселирование является типичным необратимым процессом, при котором всегда происходит увеличение энтропии, и работоспособность рабочего тела уменьшается.

Как и в каких случаях происходит изменение температуры рабочего тела при дросселировании?

При дросселировании идеального газа температура всегда остается неизменной. Характер изменения температуры при дросселировании реального газа (пара) зависит от состояния рабочего тела T перед дросселем. Для реального газа (пара), если

$T > T_{инв}$, то температура растет;

$T < T_{инв}$ – температура падает;

$T = T_{инв}$ – температура остается неизменной.

Здесь $T_{инв}$ – температура инверсии, которая зависит от рода рабочего тела и от давления.

Что такое температура инверсии?

Температура инверсии – это температура, соответствующая состоянию газа, при котором температура газа при адиабатном дросселировании не изменяется.

Для большинства газов температура инверсии высокая $t_{инв} \geq 600^{\circ}C$, хотя у водорода $t_{инв} = 57^{\circ}C$, а у гелия $t_{инв} = -239^{\circ}C$.

Графическое представление зависимости температуры инверсии от давления носит название кривой инверсии.

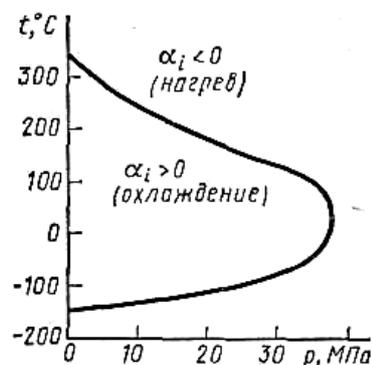


Рис.1.20. Кривая инверсии азота.

Для каждого давления вещество имеет два значения температуры инверсии: одно в области перегретого пара, другое в области жидкости. Таким образом, кривая инверсии образует замкнутый контур (рис 1.20), и если точка, отражающая состояние рабочего тела перед дросселем лежит внутри этого контура, то температура после дросселя понизится, если вне – повысится.

Что собой представляет дроссель-эффект?

Дроссель-эффект является важной характеристикой процесса дросселирования. Различают дифференциальный и интегральный дроссель-эффект.

Дифференциальный дроссель-эффект (эффект Джоуля – Томсона) представляет собой частную производную от температуры по давлению при постоянной энтальпии

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i$$

Дифференциальный дроссель-эффект отражает характер изменения температуры рабочего тела при дросселировании. Действительно, если температура при дросселировании растет, то $\alpha_i < 0$, если температура при дросселировании падает, – $\alpha_i > 0$, если температура при дросселировании растет, – $\alpha_i = 0$.

Интегральным дроссель-эффектом называется разность температур после и до дросселирования

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_i dp$$

1.17. Паросиловые установки

Как выглядит схема паросиловой установки и цикл ее работы?

Принципиальная схема паросиловой установки и реализуемый в ней цикл Ренкина представлены ниже на рисунках 1.21 и 1.22. В паросиловых установках, как и в ГТУ, для получения механической работы используется кинетическая энергия потока рабочего тела (располагаемая работа). Характерной особенностью паросиловых установок являются фазовые превращения рабочего тела (чаще всего водяного пара) в цикле.

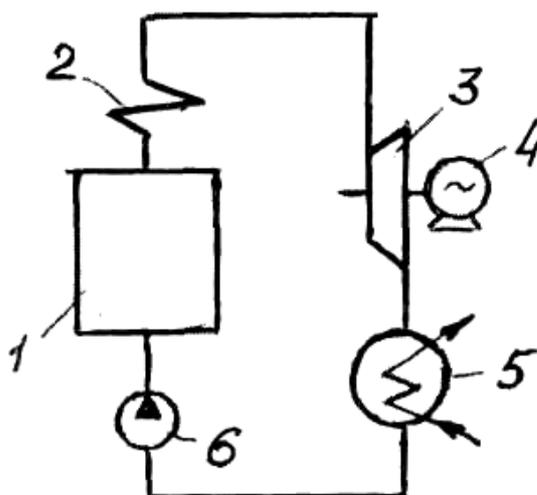


Рис 1.21. Принципиальная схема паросиловой установки.

1 – паровой котел; 2 – пароперегреватель; 3 – паровая турбина;
4 – нагрузка (эл. генератор); 5 – конденсатор; 6 – питательный насос.

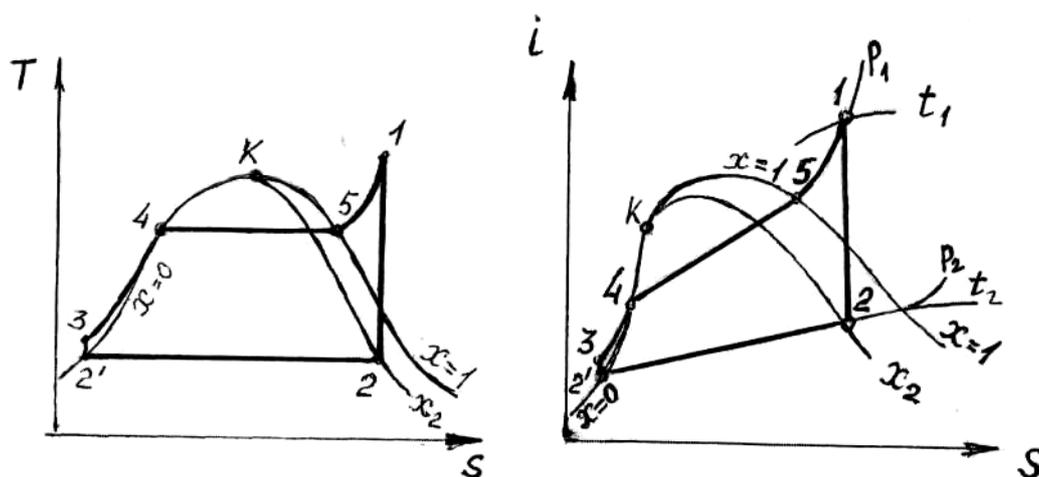


Рис 1.22. Цикл Ренкина в координатах $T-s$ (а) и $i-s$ (б).

Цикл Ренкина осуществляется следующим образом.

Перегретый пар из пароперегревателя поступает в турбину, где адиабатно расширяется (процесс 1-2), превращаясь во влажный пар со степенью сухости x_2 . Этот пар полностью конденсируется в конденсаторе при постоянном давлении p_2 и температуре t_2 (процесс 2-2'). Затем конденсат (вода) насосом подается в котел с повышением давления от p_2 до p_1 (процесс 2'-3). При этом температура воды и ее энтальпия возрастают незначительно, так что при изображении в масштабе точки 2' и 3 на диаграммах практически сливаются. В котле в изобарном процессе к воде

подводится теплота, в результате чего сначала ее температура доводится до температуры кипения (процесс 3-4), а затем вода превращается в сухой насыщенный пар (процесс 4-5). В пароперегревателе температура пара повышается до величины, соответствующей точке 1, и далее цикл повторяется.

Как определяется КПД цикла Ренкина и удельный расход пара?

Если пренебречь величиной работы, затрачиваемой на привод насоса, полезно используемая теплота в цикле (располагаемый теплоперепад) равна $q_u = i_1 - i_2$. Термический КПД цикла можно определить по формуле

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2'}}$$

где

i_1 - энтальпия перегретого пара перед турбиной;

i_2 - энтальпия влажного пара после расширения в турбине;

$i_{2'}$ - энтальпия конденсата.

Удельный расход пара при осуществлении идеального цикла Ренкина можно определить следующим образом

$$d_0 = \frac{1000}{q_u} = \frac{1000}{i_1 - i_2}, \text{ кг/МДж}$$

или

$$d_0 = \frac{3600}{q_u} = \frac{3600}{i_1 - i_2}, \text{ кг/кВт ч.}$$

Здесь значения энтальпии приняты в кДж/кг .

1. 18. Холодильные установки

В чем заключается суть работы холодильных установок?

В холодильных установках за счет подводимой к рабочему телу энергии (работы или теплоты) теплота отводится от холодного источника (охлаждаемого объема) и отдается более нагретому.

Как делятся холодильные установки в зависимости от принципа действия?

В зависимости от принципа действия холодильные установки делятся на компрессорные, парожетторные и абсорбционные.

В компрессорных холодильных установках для производства холода в цикле затрачивается работа на сжатие рабочего тела в компрессоре. Компрессорные холодильные установки в свою очередь делятся по виду рабочего тела на газовые и паровые. В паровых холодильных установках в качестве рабочего тела (хладоагента) используются пары жидкостей с низкой температурой кипения (аммиак, двуокись углерода, различные фреоны).

В пароэжекторных холодильных установках сжатие хладоагента производится в паровых эжекторах за счет кинетической энергии струи рабочего пара. В этих установках энергия затрачивается не в форме механической работы, а в форме теплоты для получения рабочего пара.

В абсорбционных холодильных установках для производства холода также затрачивается теплота в цикле. Цикл в этих установках осуществляется с использованием процесса абсорбции в бинарных смесях, которые служат рабочим телом.

Наиболее широкое применение получили паровые компрессорные холодильные установки, как более совершенные в термодинамическом отношении по сравнению с абсорбционными и пароэжекторными. Наиболее распространенными являются пароэжекторные установки.

Что собой представляет и как работает паровая компрессорная холодильная установка?

Принципиальная схема и цикл паровой компрессорной холодильной установки представлены на рисунках 1.23, 1.24.

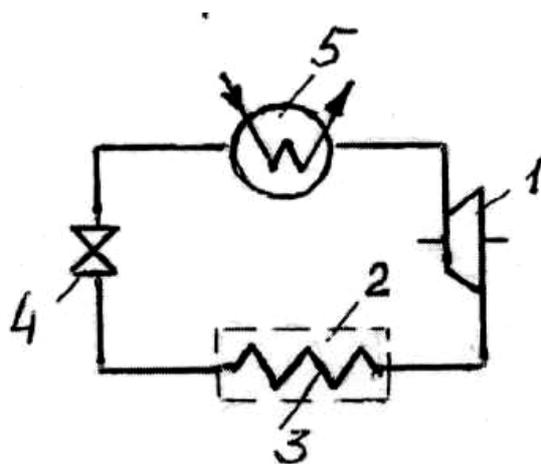


Рис.1.23. Принципиальная схема паровой компрессорной холодильной установки.

1 – компрессор; 2 – холодильная камера; 3 – испаритель;
4 – дроссель; 5 – конденсатор.

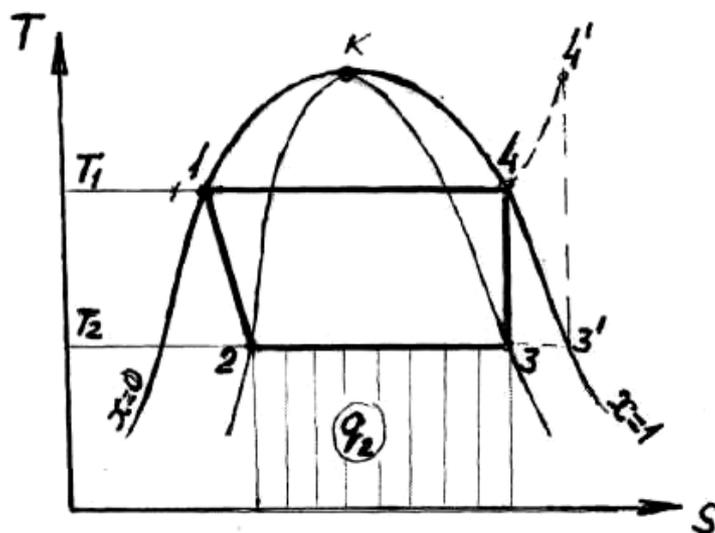


Рис.1.24. Цикл паровой компрессорной холодильной установки.

Работа холодильной установки протекает следующим образом.

Конденсат рабочего тела (хладоагента) из конденсатора через дроссель направляется в испаритель 3. В результате дросселирования (процесс 1 – 2) его давление и температура падают и конденсат превращается во влажный пар с температурой более низкой, чем температура охлаждаемого объема. В испарителе за счет подвода теплоты q_2 происходит процесс парообразования и степень сухости пара возрастает (процесс 2-3 или 2-3'). Далее этот пар адиабатно сжимается компрессором, в результате чего он превращается в сухой насыщенный или перегретый пар с более высоким давлением и температурой (процесс 3 - 4 или 3' – 4') и поступает в конденсатор 5. Здесь, в результате отвода теплоты в окружающую среду или охлаждающему теплоносителю, пар превращается в конденсат и цикл повторяется.

Что собой представляет и как работает абсорбционная холодильная установка?

Принципиальная схема абсорбционной холодильной установки представлена на рисунке 1.25.

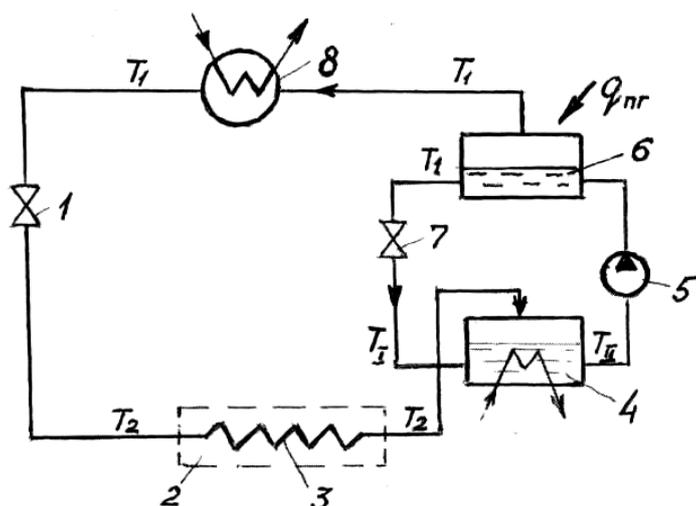


Рис.1.25. Принципиальная схема абсорбционной холодильной установки.

1, 7 – дроссели; 2 – холодильная камера; 3 – испаритель; 4 – абсорбер; 5 – насос; 6 – парогенератор; 8 – конденсатор.

В абсорбционных холодильных установках цикл осуществляется с использованием процесса абсорбции. Абсорбция – это процесс поглощения вещества (газа или пара) всем объемом другого (жидкостью). В качестве рабочего тела в этих установках используется бинарная смесь – раствор жидкостей с разной температурой кипения. Легкокипящая жидкость является хладоагентом, а другая абсорбентом (поглощающим веществом). Обычно используют такие смеси: вода (хладоагент) – бромистый литий (абсорбент) и аммиак (хладоагент) – вода (абсорбент). Абсорбент способен поглощать пары хладоагента, имеющие низкую температуру и отделяется от хладоагента при высоких температурах.

Работа аммиачной абсорбционной холодильной установки протекает следующим образом.

В парогенераторе 6 под действием подводимой теплоты q_{nr} из обогащенного водного раствора аммиака при давлении p_1 и температуре T_1 выделяется почти чистый аммиачный пар (хладоагент). Этот сухой насыщенный пар поступает в конденсатор 8, где полностью конденсируется в результате отвода теплоты в охлаждающую воду. Обедненный раствор аммиака через дроссель 7 возвращается в абсорбер. Конденсат аммиака через дроссель 1 направляется в испаритель 3. В результате дросселирования его давление и температура падают и конденсат превращается во влажный пар с температурой более низкой, чем температура охлаждаемого объема. В испарителе за счет подвода теплоты q_2 происходит процесс парообразования и степень сухости пара возрастает. Сухой насыщен-

ный пар аммиака из испарителя поступает в абсорбер, где поглощается (абсорбируется) находящимся там раствором. Выделяющаяся при абсорбции теплота отводится охлаждающей жидкостью. Концентрация аммиака в растворе в процессе абсорбции увеличивается. Обогащенный раствор насосом подается в парогенератор, где и происходит выделение хладагента (паров аммиака). Таким образом цикл замыкается. Следует отметить, что в абсорбционных установках для повышения давления и температуры пара хладагента используется не компрессор как в парокомпрессорных холодильных установках, а так называемый абсорбционный узел, состоящий из абсорбера 4, насоса 5, парогенератора 6 и дросселя 7. При этом работа на привод насоса, повышающего давление жидкости, пренебрежимо мала по сравнению с работой, затрачиваемой компрессором. Однако вместо механической работы здесь затрачивается теплота в парогенераторе q_{ng} . Эта теплота подводится при температуре кипения жидкости T_1 , соответствующей давлению p_1 в парогенераторе. Вследствие того, что в дросселе 7 происходит дросселирование раствора слабой концентрации, его температура практически не меняется, то есть $T_1 \approx T_I$. В целом же для цикла – $T_2 < T_{II} < T_1$.

Эффективность цикла абсорбционной установки оценивается коэффициентом теплоиспользования (эквивалент холодильного коэффициента)

$$\xi = \frac{q_2}{q_{ng}},$$

где

q_2 – теплота, отводимая от охлаждаемого объема;

q_{ng} – теплота, подводимая в парогенераторе.

Что такое тепловой насос?

Тепловой насос – это устройство для переноса теплоты от источника теплоты с более низкой температурой телам с более высокой температурой. Цикл теплового насоса не отличается от цикла холодильной установки. По существу, это холодильная установка, но используемая не для выработки холода, а для получения теплоты более высокого потенциала за счет использования теплоты низкопотенциального источника и дополнительных затрат механической работы либо теплоты в цикле. В качестве низкопотенциального источника может использоваться теплота грунта, водоемов, термальных вод, тепловые отходы различных установок, производств и т. п.

Как оценивается эффективность теплового насоса?

Эффективность теплового насоса оценивается отопительным коэффициентом (коэффициентом преобразования), который для парокомпрессионного теплового насоса находится по формуле

$$\psi = \frac{q_1}{l_u} = \frac{q_2 + l_u}{l_u} = \varepsilon_x + 1 ,$$

где

q_1 – теплота, отдаваемая за цикл потребителю;

q_2 – теплота, отбираемая от холодного источника;

l_u – работа, затрачиваемая в цикле;

ε_x – холодильный коэффициент.

Значение отопительного коэффициента колеблется в пределах 3...7.

2. ОСНОВЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

2.1. Общие сведения о теплообмене

Что собой представляет теплообмен?

Теплообмен – самопроизвольный необратимый процесс переноса теплоты в пространстве с неоднородным полем температур.

Что такое температурное поле?

Температурным полем называется совокупность значений температур в данный момент времени во всех точках пространства. Если во всех точках пространства температуры одинаковы, то такое температурное поле называется однородным, в противном случае – неоднородным. Если температурное поле не меняется со временем, то такое поле называется стационарным, в противном случае – нестационарным.

Что такое градиент температуры?

Градиент температуры характеризует интенсивность изменения температуры в пространстве и представляет собой вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону увеличения температуры, скалярная величина которого равна частной производной от температуры по направлению нормали. То есть

$$\text{grad}T = \bar{n}_0 \frac{\partial T}{\partial n}, K/m \text{ } (^{\circ}C/m),$$

где

\bar{n}_0 – единичный вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры.

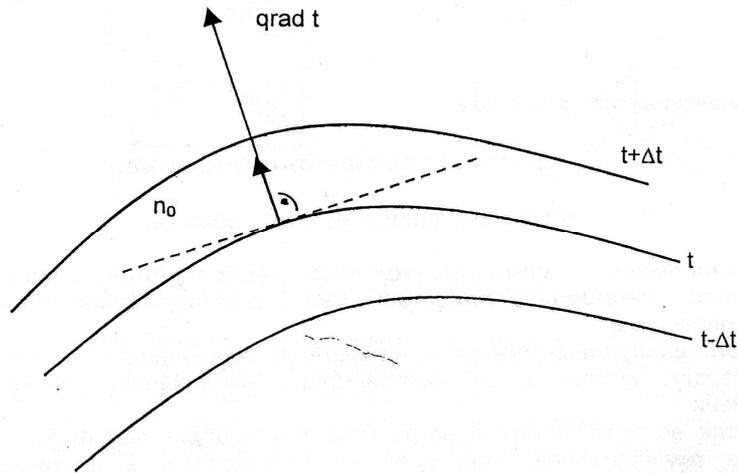


Рис. 2.1. К определению градиента температуры.

Каковы количественные характеристики процессов теплопереноса?

Основными количественными характеристиками процессов теплопереноса являются тепловой поток и плотность теплового потока.

Что такое тепловой поток?

Тепловой поток Q представляет собой количество теплоты передаваемое через какую либо поверхность в единицу времени и имеет размерность мощности – Вт.

Что такое плотность теплового потока?

Плотность теплового потока q представляет собой тепловой поток, приходящийся на единицу площади поверхности, через которую он проходит. То есть

$$q = \frac{dQ}{dF}, \text{ Вт/ м}^2,$$

или при равномерном распределении теплового потока по поверхности

$$q = \frac{Q}{F}, \text{ Вт/ м}^2.$$

Плотность теплового потока – величина векторная, и вектор плотности теплового потока направлен в сторону противоположную градиенту температуры, то есть в сторону уменьшения температуры по нормали к изотермической поверхности.

Какими способами осуществляется теплообмен?

Теплообмен является сложным процессом, который в общем случае осуществляется теплопроводностью, конвективным теплообменом и теплообменом излучением.

Что такое теплопроводность?

Теплопроводность - молекулярный способ переноса теплоты в сплошной среде при наличии градиента температуры посредством теплового движения микрочастиц и обмена кинетической энергией при их непосредственном взаимодействии.

Что собой представляет конвективный теплообмен?

Конвективный теплообмен осуществляется совместным действием молекулярного переноса теплоты – теплопроводности и конвекции – перемешивания макрообъемов среды с различной температурой. Конвективный теплообмен происходит в текучих средах (жидкостях или газах) с неоднородным полем температуры и скорости.

Что собой представляет теплообмен излучением?

Теплообмен излучением осуществляется за счет двойного преобразования энергии : превращения части внутренней энергии тела в энергию излучения (энергию фотонов или электромагнитных волн), распространения энергии излучения в пространстве и поглощения энергии излучения другим телом, при котором происходит обратное превращение энергии излучения во внутреннюю энергию тела (среды).

2.2. Теплопроводность

В чем состоит основной закон теплопроводности?

Установленный опытным путем основной закон теплопроводности (закон Фурье) гласит о том, что плотность теплового потока, передаваемого теплопроводностью прямо пропорциональна градиенту температуры. Математическая запись закона Фурье выглядит следующим образом:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}T ,$$

где

λ - коэффициент теплопроводности, $Вт/м \cdot К$.

Что такое коэффициент теплопроводности?

Коэффициент теплопроводности характеризует способность вещества передавать теплоту теплопроводностью и численно равен плотности теплового потока при градиенте температуры $1 \text{ K} / \text{м}$.

Коэффициент теплопроводности определяется опытным путем и зависит от свойств материала, температуры, давления, влажности и т. п.

Как решаются задачи теплопроводности?

Большинство задач теплопроводности решаются на основании дифференциального уравнения теплопроводности (уравнения теплопроводности Фурье):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right),$$

где

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2 / \text{с}$;

τ – время, с ;

x, y, z – пространственные координаты, м .

Решение уравнения теплопроводности Фурье с учетом начальных и граничных условий позволяет получить картину температурного поля. Такое решение для нестационарных процессов теплопроводности (нагрев и охлаждение тел, периодические процессы) представляется довольно сложным и производится приближенными и численными методами.

Для стационарного режима и одномерного температурного поля (плоские и цилиндрические стенки) получены конкретные формулы для расчета плотности теплового потока.

Что такое температуропроводность?

Коэффициент температуропроводности (температуропроводность) характеризует скорость изменения температуры в нестационарных процессах теплопроводности и является физическим параметром вещества

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \text{ м}^2 / \text{с},$$

где

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость, $\text{Дж} / \text{кг} \text{ K}$;

ρ – плотность вещества, $\text{кг} / \text{м}^3$.

Как рассчитывается плотность теплового потока через плоскую стенку?

Плотность теплового потока, передаваемого теплопроводностью через плоскую однородную стенку, находится по формуле

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2),$$

где

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $Вт/м \cdot К$;

δ – толщина стенки, $м$;

t_1 и t_2 – температуры поверхности стенки, $^{\circ}С$.

Закон изменения температуры по толщине стенки является линейным.

Величина $\frac{\lambda}{\delta}$ называется тепловой проводимостью стенки, а обратная

величина $\frac{\delta}{\lambda}$ – тепловым или термическим сопротивлением стенки.

Для случая многослойной плоской стенки из n разнородных слоев расчетная формула имеет вид:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

где t_1 и t_{n+1} – температуры на наружных поверхностях стенки, $^{\circ}С$;

δ_i – толщина i -го слоя стенки, $м$;

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, $Вт/м \cdot К$.

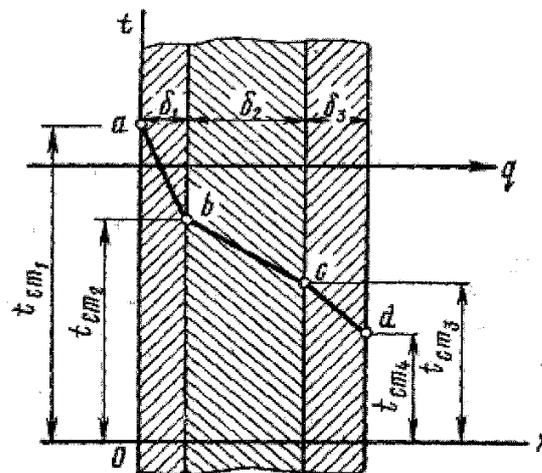


Рис. 2.2. Теплопроводность плоской стенки.

Как рассчитывается тепловой поток для цилиндрической стенки?

Тепловой поток, передаваемый теплопроводностью, для 1 м длины цилиндрической стенки (трубы) рассчитывается по формуле

$$q_l = \frac{2\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\ln d_2/d_1} \text{ Вт / м},$$

где

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$;
 d_2 и d_1 – наружный и внутренний диаметр трубы.

Соответственно плотность теплового потока для внутренней поверхности трубы

$$q_1 = \frac{2\lambda(t_1 - t_2)}{d_1 \ln d_2/d_1} \text{ Вт / м}^2.$$

Для внешней поверхности –

$$q_2 = \frac{2\lambda(t_1 - t_2)}{d_2 \ln d_2/d_1} \text{ Вт / м}^2.$$

Распределение температуры по толщине цилиндрической стенки представляет собой логарифмическую кривую.

Для многослойной цилиндрической трубы, имеющей n слоев

$$q_l = \frac{2\pi(t_1 - t_{n+1})}{\sum_1^n \frac{1}{\lambda_i} \ln d_{i+1}/d_i} \text{ Вт / м},$$

где

λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя, $\text{Вт/м}\cdot\text{К}$.
 d_{i+1} и d_i – наружный и внутренний диаметры i -го слоя трубы.

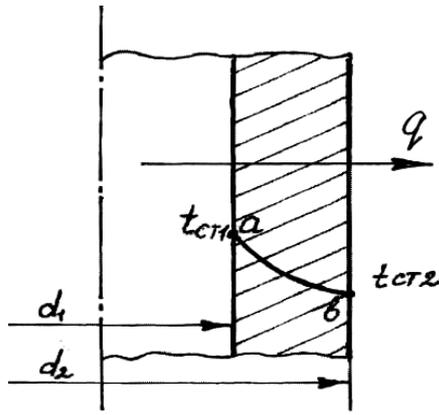


Рис. 2.3. Теплопроводность цилиндрической стенки.

2.3. Конвективный теплообмен

Что называется теплоотдачей?

Теплоотдачей называется конвективный теплообмен между поверхностью твердого тела и текучей средой (жидкостью или газом).

Как определяется плотность теплового потока при теплоотдаче?

Плотность теплового потока при теплоотдаче рассчитывается в соответствии с законом Ньютона – Рихмана

$$q = \alpha(t_c - t_{жс}) \text{ Вт/м}^2 ,$$

где

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

t_c – температура поверхности твердого тела (стенки), $^{\circ}\text{C}$;

$t_{жс}$ – температура в ядре потока жидкости (за пределами теплового пограничного слоя), $^{\circ}\text{C}$.

Величину $\Delta t = t_c - t_{жс}$ называют температурным напором. При расчетах его величину принимают по модулю. Тепловой поток всегда направлен в сторону меньшей температуры.

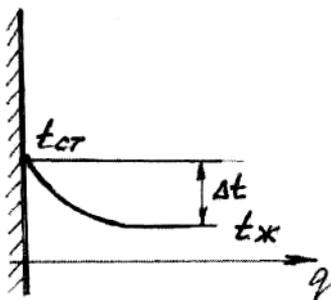


Рис.2.4. Плотность теплового потока при теплоотдаче.

Что такое коэффициент теплоотдачи?

Коэффициент теплоотдачи характеризует интенсивность конвективного теплообмена между текучей средой и поверхностью твердого тела и численно равен плотности теплового потока при температурном напоре 1 K ($^{\circ}\text{C}$).

Коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов и обычно определяется с использованием теории подобия и размерностей.

В чем состоит суть использования теории подобия при исследовании и расчете процессов теплообмена?

Использование теории подобия позволяет представить в обобщенном виде экспериментальные зависимости, полученные для каких-то конкретных условий и распространить их на другие подобные. Подобие устанавливается по равенству определенных безразмерных чисел или критериев. Критерии подобия с физической точки зрения выражают соотношения между различными физическими эффектами, определяющими исследуемый процесс. Критерии (числа) подобия состояются из определенных величин на основании анализа дифференциальных уравнений математической физики, описывающих рассматриваемые явления. Эти безразмерные комплексы связаны критериальными уравнениями, конкретный вид которых зависит от исследуемых процессов. При этом все критерии подобия можно разделить на определяемые, к которым относятся критерии, содержащие искомую величину и определяющие, которые составлены из величин, заданных при математическом описании процессов.

Числа подобия принято называть именами крупных ученых в области теплообмена и гидродинамики.

Какие критерии используются при исследовании конвективного теплообмена?

При исследовании конвективного теплообмена наиболее часто используются нижеприведенные критерии.

Критерий (число) Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda},$$

где

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт} / \text{м}^2 \text{ К}$;

l – характерный размер, м ;

λ – коэффициент теплопроводности среды (жидкости или газа), $\text{Вт} / \text{м К}$.

Критерий Нуссельта характеризует интенсивность конвективной теплоотдачи и по существу является безразмерным коэффициентом теплоотдачи. Обычно он является определяемым критерием.

Критерий Эйлера
$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2},$$

где

Δp – перепад давления, Па ;

ρ – плотность жидкости, кг / м³ ;

ω – средняя скорость жидкости в потоке, м / с.

Критерий Эйлера характеризует соотношение сил давления и сил инерции.

Критерий Рейнольдса
$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu},$$

где

ω – средняя скорость жидкости в потоке, м / с ;

l – характерный размер, м ;

ν – кинематическая вязкость, м² / с .

В качестве характерного размера при определении числа Рейнольдса обычно принимается гидравлический диаметр.

Критерий Рейнольдса характеризует режим движения жидкости и выражает соотношение сил инерции и сил вязкого трения в потоке жидкости.

Критерий Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

где

ν – кинематическая вязкость, м² / с ;

a – коэффициент температуропроводности, м² / с .

Коэффициент температуропроводности определяется выражением

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho},$$

где

λ – коэффициент теплопроводности среды (жидкости или газа), Вт/м К;

c_p – удельная массовая изобарная теплоемкость среды, Дж / кг · К ;

ρ – плотность среды, кг / м³ .

Критерий Прандтля отражает подобие полей температур и скоростей текучей среды и по существу является теплофизической характеристикой среды.

Критерий Грасгофа

$$Gr = g\beta \cdot \Delta t \frac{l^3}{\nu^2},$$

где

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

β – температурный коэффициент объемного расширения, (для газа $\beta = 1/T$), K^{-1} .

Δt – температурный напор, $^{\circ}C$;

l – характерный размер, m ;

ν – кинематическая вязкость, m^2/c .

Критерий Грасгофа характеризует соотношение подъемной силы, возникающей вследствие разности плотности жидкости с различной температурой, и сил вязкого трения.

2.4. Теплообмен излучением

Каковы основные особенности и характеристики теплообмена излучением?

При теплообмене излучением перенос энергии в пространстве происходит в виде энергии электромагнитного поля, имеющего квантово-волновую структуру. Все природные тела с температурой выше абсолютного нуля излучают и поглощают энергию в виде квантов электромагнитного поля. Волновые свойства электромагнитного поля проявляются в том, что излучение характеризуется длиной волны и частотой колебаний.

Спектр излучения у большинства твердых или жидких тел является сплошным, то есть эти тела излучают энергию во всем диапазоне длин волн. Для чистых металлов и газов характерно селективное (избирательное) излучение, то есть у них спектр излучения линейчатый. При теплообмене излучением основное количество энергии переносится в диапазоне длин волн $\lambda_u = 0,8 \text{ мкм} - 0,8 \text{ мм}$ (инфракрасное или тепловое излучение).

Излучение у твердых и жидких тел происходит с их поверхности. Процесс излучения газов является объемным.

Основными количественными характеристиками процесса излучения являются поток излучения и плотность потока излучения.

Поток излучения Q_u (Bm) представляет собой энергию излучения, переносимую через какую-либо поверхность в единицу времени.

Поверхностная плотность потока излучения (интегральная) E (Bm/m^2) равна потоку излучения, приходящему на единицу площади

поверхности F , через которую он проходит.

$$E = \frac{Q_u}{F}; \text{ или } E = \frac{dQ_u}{dF}.$$

Лучистый теплообмен сопровождается двойным превращением энергии: тепловой (внутренней энергии) – в лучистую у излучающего тела и лучистой – в тепловую (внутреннюю энергию) у поглощающего тела. При этом часть попадающей на поверхность тела лучистой энергии может поглощаться телом (E_A), часть отражаться (E_R), а часть проходить через тело (E_D).

Как различаются тела по восприятию лучистой энергии?

Тело по восприятию лучистой энергии характеризуется коэффициентами поглощения (A), отражения (R) и пропускания (D), значения которых определяются по формулам:

$$A = \frac{E_A}{E}; \quad R = \frac{E_R}{E}; \quad D = \frac{E_D}{E}.$$

Здесь E, E_A, E_R, E_D – соответственно плотность, падающего на поверхность тела, потока излучения, поглощенного, отраженного и пропущенного через тело.

При этом $A+R+D = 1$.

Тело, для которого $A = 1$, называют абсолютно черным; если $R = 1$, такое тело называют зеркальным или абсолютно белым; если $D = 1$, тело называют абсолютно прозрачным.

В природе абсолютных тел нет, и все тела считаются серыми. Серые тела характеризуются степенью черноты, которая равна отношению плотности потока собственного излучения к плотности потока излучения абсолютно черного тела при той же температуре

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0}.$$

В соответствии с законом Кирхгофа степень черноты тела равна его коэффициенту поглощения, то есть $\varepsilon = A$.

Какими основными законами пользуются при расчетах теплообмена излучением?

При расчетах теплообмена излучением в основном используют закон Стефана-Больцмана, закон Кирхгофа и закон Ламберта.

Закон Стефана-Больцмана устанавливает связь между плотностью потока излучения абсолютно черного тела и его температурой. Математическая запись этого закона имеет вид:

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad \text{или} \quad E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где

σ_0 – постоянная излучения абсолютно черного тела ($\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / \text{ м}^2 \cdot \text{ К}^4$);

c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($c_0 = 5,67 \text{ Вт} / \text{ м}^2 \cdot \text{ К}^4$).

Для серого тела закон Стефана-Больцмана записывается следующим образом:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = c \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon \cdot c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где

$c = \varepsilon \cdot c_0$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела;

ε – степень черноты серого тела.

Закон Кирхгофа гласит о том, что отношение плотности потока излучения к его коэффициенту поглощения при данной температуре не зависит от природы тела и равно потоку излучения абсолютно черного тела при той же температуре:

$$\frac{E}{A} = E_0.$$

Из закона Кирхгофа следует, что степень черноты серого тела равна его коэффициенту поглощения, то есть $\varepsilon = A$.

Закон Ламберта устанавливает зависимость интенсивности излучения от его направления по отношению к поверхности излучения.

$$E_{\varphi} = E_n \cdot \cos \varphi ,$$

где

E_{φ} – плотность потока излучения в направлении, составляющем угол φ по отношению к направлению нормали к излучаемой поверхности;

E_n – плотность потока излучения в направлении нормали к излучаемой поверхности.

Как рассчитывается теплообмен излучением между телами?

Расчеты теплообмена излучением довольно сложны. Аналитические решения получены лишь для некоторых простейших случаев. Обычно плотность потока, передаваемого излучением между двумя поверхностями в прозрачной среде, определяют по формуле

$$E = \varepsilon_{np} \cdot c_0 \cdot \varphi \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] ,$$

где

ε_{np} – приведенная степень черноты системы;

φ – коэффициент облученности (угловой коэффициент), зависящий от взаимного расположения поверхностей.

Формулы для расчета ε_{np} и φ для соответствующих систем теплообмена излучением можно найти в специальной литературе.

2.5. Теплопередача и основы расчета теплообменников

Что такое теплопередача и как выглядит уравнение теплопередачи?

Теплопередачей называют процесс переноса теплоты от одной среды (теплоносителя) к другой через разделяющую стенку.

Следует отметить, что часто термин "теплопередача" используется в более широком толковании, когда под теплопередачей понимают любой процесс теплообмена.

Основное уравнение теплопередачи имеет вид:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t ,$$

где

Q – тепловой поток, $Вт$;

K – коэффициент теплопередачи, $Вт/м^2К$;

F – площадь поверхности теплопередачи, $м^2$;

Δt – температурный напор (разность температур теплоносителей), $^{\circ}С$.

Что собой представляет коэффициент теплопередачи и как он рассчитывается?

Коэффициент теплопередачи характеризует интенсивность процесса теплопередачи и численно равен плотности теплового потока при температурном напоре $1^{\circ}С$.

Для плоской разделяющей стенки коэффициент теплопередачи рассчитывается по формуле

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} ,$$

где

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи с одной и другой стороны разделяющей стенки, $Вт/м^2 \cdot К$;

δ – толщина стенки, $м$;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $Вт/м \cdot К$.

Для многослойной стенки из n слоев

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} ,$$

где

δ_i, λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности i -го слоя стенки.

В случае цилиндрической разделяющей стенки пользуются линейным коэффициентом теплопередачи K_l , $Вт/м \cdot К$, который при многослойной стенке рассчитывается по формуле

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_1^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}} .$$

Здесь d_i и d_{i+1} – внутренний и наружный диаметры i -го слоя стенки.

При использовании линейного коэффициента теплопередачи удельный тепловой поток, приходящийся на 1 м длины, трубы находят по формуле

$$q_l = K_l \cdot \Delta t \cdot \pi, \text{ Вт / м},$$

где

Δt – температурный напор (разность температур теплоносителей), $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплопередачи относительно расчетной поверхности в этом случае находят следующим образом:

$$K = \frac{K_l}{d}, \text{ Вт / м}^2 \cdot \text{K},$$

где

d – диаметр расчетной поверхности.

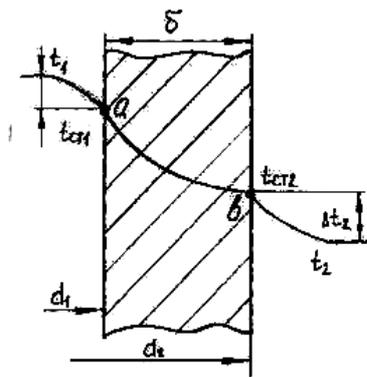


Рис.2.5. Теплопередача через цилиндрическую стенку.

Что такое теплообменник и как делятся теплообменники по принципу действия?

Теплообменник – это устройство, предназначенное для передачи теплоты от одного теплоносителя (горячего) другому (холодному).

По принципу действия теплообменники делятся на рекуперативные, регенеративные и смесительные.

В рекуперативных теплообменниках перенос теплоты от одного теплоносителя к другому происходит через разделяющую стенку.

В регенеративных теплообменниках холодный и горячий теплоносители поочередно поступают в теплообменный аппарат или его часть. При этом теплообменник выступает как аккумулятор теплоты, который накапливает ее, когда в нем находится горячий теплоноситель и отдает ее холодному теплоносителю, когда он поступает в теплообменник. Типичным

примером регенеративных теплообменников являются воздухонагреватели в газотурбинных установках.

В смесительных теплообменниках перенос теплоты от горячего теплоносителя к холодному осуществляется при их непосредственном контакте и смешивании. Примерами таких теплообменников являются смесительные конденсаторы, градирни и т. п.

Наиболее широкое распространение нашли рекуперативные теплообменники, которые классифицируют по назначению, роду теплоносителей, характеру их движения относительно теплопередающей поверхности и по организации движения теплоносителей относительно друг друга.

В чем заключается тепловой расчет рекуперативных теплообменников?

Расчеты теплообменных аппаратов включают тепловой расчет, гидравлические, компоновочные и прочностные расчеты.

Основной задачей теплового расчета теплообменника при его проектировании является определение площади поверхности теплообмена для заданной тепловой мощности теплообменника (теплового потока, передаваемого через поверхность теплообмена). При проверочных расчетах обычно для заданных конструктивных параметров теплообменника определяется тепловой поток, передаваемый через поверхность теплообмена, или температуры теплоносителей на выходе из теплообменника.

Тепловой расчет теплообменника ведут с использованием уравнения теплового баланса и основного уравнения теплопередачи. Уравнение теплового баланса имеет вид

$$Q_1 = Q_2 + Q_{nom} ,$$

где

Q_1 – тепловой поток, отдаваемый горячим теплоносителем, $кВт$;

Q_2 – тепловой поток, воспринимаемый холодным теплоносителем, $кВт$;

Q_{nom} – потери теплоты в окружающую среду в единицу времени, $кВт$.

Учитывая, что величина тепловых потерь мала по сравнению с тепловым потоком, передаваемым через поверхность теплообмена между теплоносителями, часто уравнение теплового баланса используют в виде

$$Q = Q_1 = Q_2 .$$

Здесь величину Q можно считать тепловой мощностью теплообменника.

Как правило, процесс теплообмена в теплообменнике осуществляется при постоянном давлении. В этом случае количество теплоты, отданное

или полученное теплоносителем, может быть найдено по разности энтальпий теплоносителей на входе и выходе из теплообменника и уравнение теплового баланса может быть записано следующим образом:

$$Q = m_1 (i_1' - i_1'') = m_2 (i_2'' - i_2') ,$$

где

m_1 и m_2 – массовый расход через теплообменник, соответственно, горячего и холодного теплоносителя, $кг/с$;

i_1' и i_1'' – удельная энтальпия горячего теплоносителя, соответственно, на входе и выходе из теплообменника, $кДж/кг$;

i_2' и i_2'' – удельная энтальпия холодного теплоносителя, соответственно, на входе и выходе из теплообменника, $кДж/кг$.

При отсутствии фазовых превращений теплоносителей в теплообменнике уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$Q = m_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = m_2 c_{p2} (t_2'' - t_2') ,$$

где

c_{p1} и c_{p2} – удельная массовая изобарная теплоемкость, соответственно, горячего и холодного теплоносителя, $кДж/кг К$;

t_1' и t_1'' – температура горячего теплоносителя, соответственно, на входе и выходе из теплообменника, $^{\circ}C$;

t_2' и t_2'' – температура холодного теплоносителя, соответственно, на входе и выходе из теплообменника, $^{\circ}C$.

Уравнение теплового баланса обычно используется для определения тепловой мощности теплообменника, либо расхода одного из теплоносителей, либо перепада температур.

Основное уравнение теплопередачи

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp} \cdot 10^{-3}$$

обычно используют для расчета площади теплопередачи.

Здесь

Q – тепловой поток, передаваемый через поверхность теплообмена (тепловая мощность теплообменника), $кВт$;

K – коэффициент теплопередачи, $Вт / м^2 К$;

F – площадь поверхности теплообмена, $м^2$;

Δt_{cp} – средний температурный напор (усредненная по поверхности теплообменника разность температур горячего и холодного теплоносителя), $^{\circ}C$.

Площадь поверхности теплопередачи из уравнения теплопередачи рассчитывается по формуле

$$F = \frac{Q \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t_{cp}}$$

Как определяется средний (расчетный) температурный напор?

Величина расчетного температурного напора зависит от организации движения теплоносителей друг относительно друга и от начальных и конечных температур теплоносителей. На рисунке 2.6. представлены основные схемы движения теплоносителей в теплообменниках.

Для простейших схем движения – прямотока и противотока расчетный температурный напор определяется как среднелогарифмический

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\epsilon}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\epsilon}}},$$

где

Δt_{δ} и Δt_{ϵ} – большее и меньшее значение температурного напора на входе и выходе из теплообменника.

При незначительной разнице Δt_{δ} и Δt_{ϵ} ($\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\epsilon} \leq 1,7$) расчетный температурный напор можно определять как среднеарифметический

$$\Delta t_{cp} = 0,5(\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\epsilon}).$$

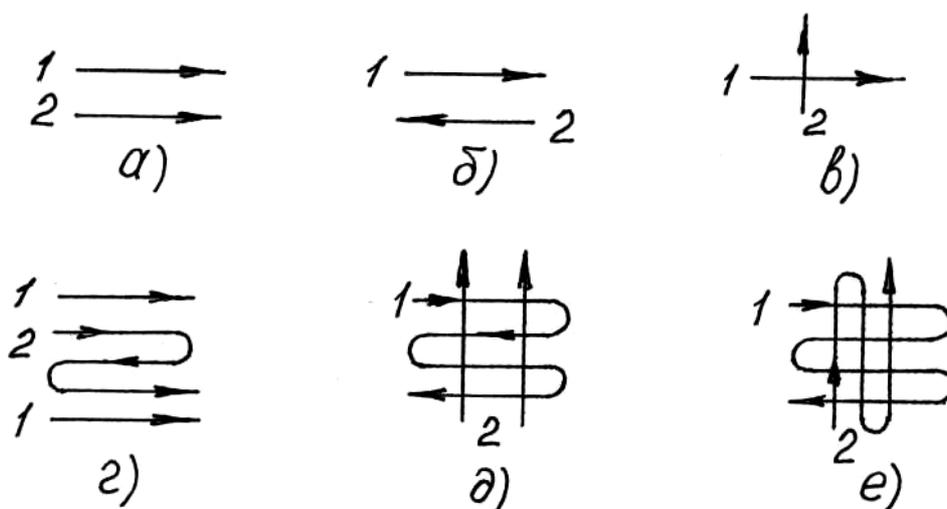


Рис. 2.6. Схемы движения теплоносителей.

а – прямоток; б – противоток; в – смешанное движение;
г – перекрест; д,е – сложный перекрест.

Для того, чтобы избежать ошибки при определении Δt_{δ} и $\Delta t_{\text{м}}$, рекомендуется изображать картину изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена. Характер изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности теплообмена зависит от схемы движения теплоносителей, соотношения теплоемкостей массовых расходов теплоносителей и наличия фазовых превращений теплоносителей в процессе теплообмена (см. рисунки 2.7., 2.8).

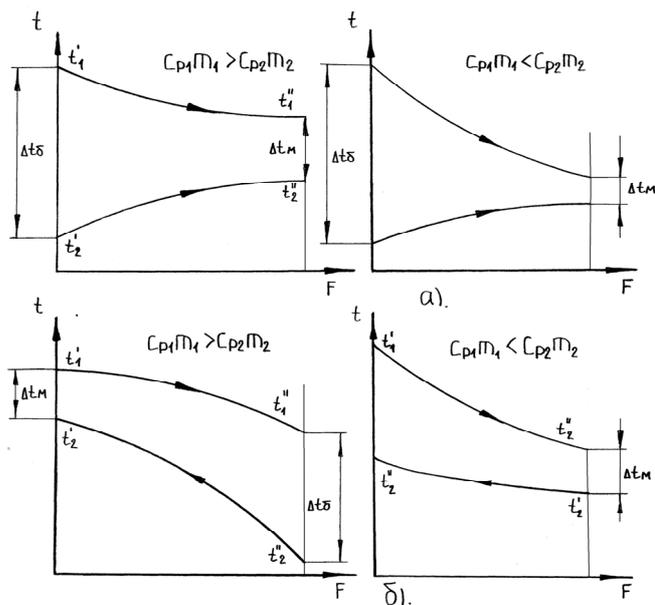


Рис. 2.7. Изменение температуры теплоносителей по поверхности теплообмена при отсутствии фазовых превращений теплоносителей
а) – прямоток; б) – противоток

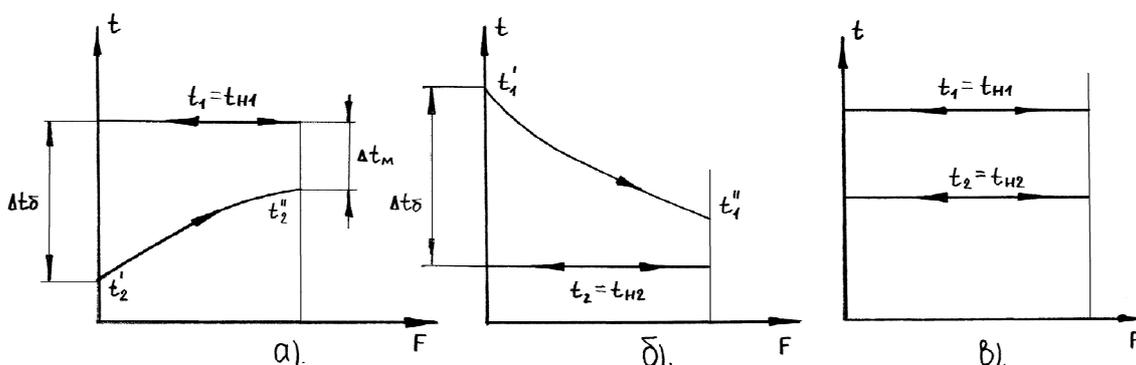


Рис. 2.8. Изменение температуры теплоносителей по поверхности теплообмена при фазовых превращениях теплоносителей.
а) – при конденсации горячего теплоносителя; б) – при испарении холодного теплоносителя; в) – при фазовых превращениях обоих теплоносителей.

При сложных схемах движения теплоносителей средний температурный напор определяют, умножая температурный напор, рассчитанный для противотока, на поправочный коэффициент, который находят по номограммам, приводимым в специальной литературе, с учетом схемы движения теплоносителей и перепадов их температур.

2.6. Общие сведения о массообмене

Что собой представляет массообмен?

Массообмен – необратимый самопроизвольный процесс переноса массы компонента среды в пространстве с неоднородным полем концентрации или парциального давления этого компонента.

Что такое концентрационное поле (поле концентрации)?

Концентрационным полем называется совокупность значений концентрации компонента среды в данный момент времени во всех точках пространства. Если во всех точках пространства концентрация одинакова, то такое концентрационное поле называется однородным, в противном случае – неоднородным. Если концентрационное поле не меняется со временем, то такое поле называется стационарным, в противном случае – нестационарным.

Что такое компонент среды?

Компонентом среды называют всякое химически индивидуальное вещество.

Что называют фазой?

Фазой называют часть неоднородной термодинамической системы, ограниченную поверхностями раздела.

Что такое градиент концентрации?

Градиент концентрации характеризует интенсивность изменения концентрации в пространстве и представляет собой вектор, направленный по нормали к изоконцентрационной поверхности в сторону увеличения концентрации, скалярная величина которого равна частной производной от концентрации по направлению нормали. То есть

$$\text{grad}C = \bar{n}_0 \frac{\partial C}{\partial n}, \quad \text{кг/м}^4,$$

где

\bar{n}_0 – единичный вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры;

C – концентрация компонента, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Каковы количественные характеристики процессов массопереноса?

Основными количественными характеристиками процессов теплопереноса являются поток массы и плотность потока массы.

Что такое поток массы?

Поток массы J представляет собой массу компонента смеси, проходящую через какую либо поверхность в единицу времени и имеет размерность – $\text{кг}/\text{с}$.

Что такое плотность потока массы?

Плотность потока массы j представляет собой поток массы, приходящийся на единицу площади поверхности, через которую он проходит.

То есть

$$j = \frac{dJ}{dF}, \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ с},$$

или при равномерном распределении потока массы по поверхности

$$j = \frac{J}{F}, \text{ кг}/\text{м}^2 \text{ с}.$$

Плотность потока массы, как и поток массы, – величина векторная, и вектор плотности потока массы в пределах одной фазы направлен в сторону противоположную градиенту концентрации распределяемого вещества.

В чем состоят особенности процессов массопередачи и массоотдачи?

Массообмен, осуществляемый между двумя фазами через поверхность раздела фаз, называют массопередачей.

Вещество, переходящее при массопередаче из одной фазы в другую, носит название распределяемого вещества или целевого компонента. Поверхность раздела фаз, участвующих в массообмене, называют поверхностью массообмена. В зависимости от состояния границы раздела фаз массообменные процессы подразделяют на массопередачу в системах со свободной границей раздела фаз (газ – жидкость, пар – жидкость, жидкость – жидкость), массопередачу в системах с неподвижной поверхностью кон-

такта фаз (газ – твердое тело, пар – твердое тело, жидкость – твердое тело) и массопередачу через полупроницаемые перегородки (мембраны). Процесс массопередачи состоит из трех стадий: перемещения распределяемого вещества в отдающей фазе к границе раздела фаз, перехода через поверхность раздела фаз и перемещения распределяемого вещества от границы раздела внутрь воспринимающей фазы.

Массоотдачей называют массообмен, осуществляемый в пределах одной фазы между ее ядром и поверхностью раздела фаз.

Перенос вещества в пределах одной фазы может осуществляться двумя способами: молекулярной диффузией и конвективным переносом (конвективной диффузией). Первый способ является следствием теплового движения микрочастиц (молекул, ионов, атомов). Конвективная диффузия обусловлена перемещением вещества вместе с макрообъемами среды в условиях турбулентного движения фазы.

Как рассчитывается молекулярная диффузия?

Молекулярная диффузия описывается первым законом Фика, согласно которому плотность потока массы диффундирующего вещества прямо пропорциональна градиенту его концентрации:

$$j = -D \frac{\partial C}{\partial n} = -D \cdot \text{grad}C,$$

где j – плотность потока массы, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$;

D – коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$;

$\text{grad}C$ – градиент концентрации, $\text{кг}/\text{м}^4$.

Закон Фика является аналогом закона Фурье (основного закона теплопроводности), а коэффициент молекулярной диффузии – аналогом коэффициента теплопроводности.

Дифференциальное уравнение молекулярной диффузии (второй закон Фика) имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right),$$

где τ – время;

x, y, z – декартовы координаты.

Что такое коэффициент молекулярной диффузии?

Коэффициент молекулярной диффузии (коэффициент диффузии) характеризует скорость процесса молекулярной диффузии и численно равен плотности потока массы при градиенте концентрации равном единице.

Коэффициент молекулярной диффузии зависит от природы диффундирующего вещества, и его значение находят по справочникам или рассчитывают по эмпирическим формулам. Наибольшие значения коэффициент молекулярной диффузии имеет для газов, наименьшие – для твердых тел.

Коэффициент молекулярной диффузии также зависит от температуры (увеличивается с ростом температуры) и для газов – от давления (с повышением давления уменьшается).

Как рассчитывается конвективная диффузия?

Для конвективной диффузии используется дифференциальное уравнение конвективной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right),$$

где

C – концентрация диффундирующего вещества;

V_x, V_y, V_z - составляющие вектора скорости по координатам;

τ – время;

x, y, z – декартовы координаты.

Это уравнение выражает в общем виде распределение концентрации компонента в движущемся потоке при неустановившемся процессе массопереноса. Для полного описания процесса уравнение конвективной диффузии должно быть дополнено уравнениями движения Навье-Стокса и неразрывности потока, а также уравнениями, отражающими зависимость физических свойств фазы от ее состава. Решение такой системы уравнений представляет большие трудности, поэтому обычно такие задачи решают с использованием теории подобия.

Как рассчитывается процесс массоотдачи?

Процесс массоотдачи с достаточной для практических расчетов точностью описывается законом Шукарева:

$$j = \beta \cdot (C_n - C_c),$$

где

j – плотность потока массы, $кг/м^2 \cdot с$;

β – коэффициент массоотдачи, $м/с$;

C_n и C_c – концентрация распределяемого вещества у поверхности раздела фаз и в ядре потока (среды) соответственно, $кг/м^3$.

При расчетах разность ($C_n - C_c$) берется по модулю.

Закон Щукарева является аналогом закона теплоотдачи (закона Ньютона – Рихмана), а коэффициент массоотдачи – аналогом коэффициента теплоотдачи.

Что такое коэффициент массоотдачи?

Коэффициент массоотдачи характеризует интенсивность массообмена между ядром фазы и поверхностью раздела фаз и численно равен плотности потока массы при разности концентраций распределяемого вещества у поверхности раздела фаз и в ядре потока (среды) равной единице.

Коэффициент массоотдачи зависит от многих факторов, и для его определения используются критериальные зависимости.

Какие критериальные зависимости используются для определения коэффициента массоотдачи?

Для определения коэффициента массоотдачи обычно используется критериальное уравнение, которое в общем случае имеет вид:

$$Nu_m = f(Re, Gr, Pr_m, Fo_m).$$

В этом уравнении определяемым является диффузионный критерий Нуссельта Nu_m , а определяющими – критерий Рейнольдса, Грасгофа, диффузионный критерий Прандтля Pr_m и диффузионный критерий Фурье Fo_m .

Каждый из критериев характеризует процесс массоотдачи с определенной стороны.

Диффузионный критерий (число) Нуссельта

$$Nu_m = \frac{\beta \cdot l}{D},$$

где

β – коэффициент массоотдачи, $м/с$;

l – характерный размер, $м$;

D – коэффициент молекулярной диффузии, $м^2/с$.

Критерий Нуссельта характеризует массообмен у поверхности раздела фаз и выражает соотношение между интенсивностью переноса вещества в ядре фазы конвективной диффузией (β) и интенсивностью массопереноса молекулярной диффузией в диффузионном слое (D).

По значению критерия Нуссельта определяют коэффициент массоотдачи

$$\beta = \frac{Nu_m D}{l}$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$$

где

ω – средняя скорость жидкости в потоке, m/c ;

l – характерный размер, m ;

ν – кинематическая вязкость, m^2/c .

В качестве характерного размера при определении числа Рейнольдса обычно принимается гидравлический диаметр.

Критерий Рейнольдса характеризует режим движения жидкости и выражает соотношение сил инерции и сил вязкого трения в потоке жидкости.

Критерий Грасгофа

$$Gr = g\beta \cdot \Delta t \frac{l^3}{\nu^2}$$

где

g – ускорение свободного падения, m/c^2 ;

β – температурный коэффициент объемного расширения, (для газа $\beta = 1/T$), K^{-1} .

Δt – температурный напор, $^{\circ}C$;

l – характерный размер, m ;

ν – кинематическая вязкость, m^2/c

Критерий Грасгофа характеризует соотношение подъемной силы, возникающей вследствие разности плотности жидкости с различной температурой, и сил вязкого трения.

Диффузионный критерий Прандтля

$$Pr_m = \frac{\nu}{D}$$

где

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

D – коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$.

Критерий Прандтля отражает подобие полей скоростей и концентраций и определяется только физическими свойствами вещества.

Диффузионный критерий Фурье

$$Fo_m = \frac{\tau \cdot D}{l^2},$$

где τ - время, с.

Диффузионный критерий Фурье характеризует подобие неустановившихся процессов массообмена.

Для стационарных процессов из общего критериального уравнения исключается критерий Фурье, и оно приобретает вид

$$Nu_m = f(Re, Gr, Pr_m).$$

При вынужденной движении пренебрегают естественной конвекцией. В этом случае из уравнения выпадает критерий Грасгофа, и уравнение приобретает вид

$$Nu_m = f(Re, Pr_m).$$

Конкретный вид критериального уравнения зависит от характера процесса и условий его протекания.

В чем состоит тройная аналогия?

Тройная аналогия состоит в том, что процессы переноса теплоты, массы и механической энергии в потоке движущейся среды описываются однотипными дифференциальными уравнениями.

Исходя из этой аналогии, можно приближенно определять коэффициенты массоотдачи по данным о трении жидкостного потока или о скорости переноса теплоты.

Приближенность аналогии обусловлена зависимостью физических параметров среды (теплоемкости, теплопроводности, температуропроводности, вязкости и коэффициента диффузии) от температуры и концентрации и рядом других причин.

Как рассчитывается процесс массопередачи?

При расчете процесса массопередачи – процесса переноса распределяемого вещества из одной фазы (отдающей) в другую (воспринимающую)

шую) – используется основное уравнение массопередачи:

$$dJ = K\Delta C dF$$

Или

$$j = K\Delta C,$$

где

J – поток массы, $кг/с$;

j – плотность потока массы, $кг/м^2 \cdot с$;

K – коэффициент массопередачи, $м/с$;

ΔC – движущая сила процесса массопередачи, представляющая собой разность между фактической и равновесной концентрацией распределяемого вещества в фазе, $кг/м^3$;

F – площадь поверхности раздела фаз, $м^2$.

Уравнение массопередачи можно записать как для отдающей как для отдающей, так и для воспринимающей фазы:

$$j = K_y (y - y_p);$$

$$j = K_x (x_p - x),$$

где

K_y – коэффициент массопередачи для отдающей фазы;

y и y_p – значения фактической и равновесной концентраций распределяемого вещества в отдающей фазе;

K_x – коэффициент массопередачи для воспринимающей фазы;

x и x_p – значения фактической и равновесной концентраций распределяемого вещества в воспринимающей фазе.

Что такое коэффициент массопередачи?

Коэффициент массопередачи характеризует интенсивность массопереноса распределяемого вещества из одной фазы в другую через разделяющую поверхность и численно равен плотности потока массы при движущей силе процесса (разности между фактической и равновесной концентрациями) равном единице.

Коэффициент массопередачи K ($м/с$) является величиной, обратной диффузионному сопротивлению R_m ($с/м$).

Что такое равновесная концентрация?

Под равновесной концентрацией понимают такое значение концентрации распределяемого вещества в фазе, соответствующее определенной концентрации этого вещества в другой фазе, при котором в процессе массообмена между фазами наступает динамическое равновесие. При этом количество вещества, перешедшего из первой фазы во вторую, становится равным количеству вещества, перешедшего из второй фазы в первую. То есть, по существу при достижении равновесной концентрации процесс массопередачи прекращается.

Зависимость равновесной концентрации вещества в фазе от концентрации этого вещества в смежной фазе носит название равновесной линии.

Как определяется значение коэффициента массопередачи?

Коэффициент массопередачи определяется по значениям диффузионных сопротивлений массоотдаче в фазах. Если равновесная линия прямая, то есть $y_p = m \cdot x$, то коэффициенты массопередачи по отдающей фазе K_y и воспринимающей фазе K_x могут быть рассчитаны по формулам:

$$K_y = \frac{1}{1/\beta_y + m/\beta_x} ;$$

$$K_x = \frac{1}{1/\beta_x + 1/m\beta_y} ,$$

где

β_y и β_x – коэффициенты массоотдачи для отдающей и воспринимающей фаз.

Что такое термодиффузия?

Термодиффузия представляет собой диффузию, обусловленную наличием градиента температуры. При термодиффузии концентрация компонентов фазы в областях пониженной и повышенной температур становится различной, и таким образом возникает движущая сила процесса массопереноса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Амерханов Р.А., Драганов Б.Х. Теплотехника. – М.: Энергоатомиздат, 2006.
2. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.Г. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1990.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. школа, 1980.
4. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981.
5. Кириллин В.А. и др. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
6. Теплотехника./ Под редакцией Крутова В.И. – М.: Машиностроение, 1986.
7. Теплотехника./ Под редакцией Баскакова А.П.. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
8. Теплотехника./ Под редакцией Луканина В.Н. – М.: Высшая школа, 2000.
9. Юдаев Б.Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. – М.: Высшая школа, 1988.

Предметный указатель

А	Д
Абсолютная влажность воздуха 42	Давление 5
Абсолютно белое тело 69	Диаграмма 43
- прозрачное тело..... 69	- <i>i - d</i> влажного воздуха ... 43
- черное тело 69	- <i>i-s</i> пара 40
Абсорбционные холодильные	- тепловая..... 12
установки 55,57	- рабочая 12
Адиабатное течение 33,34	- фазовых переходов..... 36
Адиабатный процесс 16	Диффузия молекулярная..... 79,80
Адиабатная система 4	- конвективная..... 79,80
	Диффузор..... 44,45
	Дросселирование 51
	Дроссель-эффект..... 52
	- дифференциальный 53
	- интегральный 53
В	З
Влагоемкость воздуха 43	Закон Дальтона 8
Влагосодержание воздуха 43	- Кирхгофа 70
Влажность воздуха.....	- Ламберта..... 70
- - абсолютная 42	- Ньютона – Рихмана 65
- - относительная 42	- Стефана-Больцмана..... 70
Влажный воздух 41	- Фика..... 70
Влажный пар..... 38	- Фурье 62
Внутренняя энергия 7	- Щукарева..... 81
Второй закон термодинамики ... 13	
	И
	Идеальный газ 4
	Идеальный компрессор 33
	Изменение внутренней энергии 15
	Изменение энтальпии 15
	Изменение энтропии..... 15
	Изобарная теплоемкость 7
	Изохорная теплоемкость 7
Г	
Газовая постоянная 6	
- - универсальная 6	
Газовая постоянная смеси 11	
Газовая смесь 9	
Газотурбинная установка 29	
Градиент температуры..... 60	
Градиент концентрации..... 78	

Изобарный процесс	11
Изотермический процесс	12
Изохорный процесс	10
Инверсия	52

К

Компрессор	32
- идеальный	33
Компрессорные холодильные установки	55,56
Конвективная диффузия	79,80
Конвективный теплообмен	78
Концентрационное поле	78
Коэффициент массоотдачи... ..	81,82
- массопередачи	84,85
- молекулярной диффузии	80
- температуропроводности	63
- теплоиспользования	58
- теплоотдачи	65,66
- теплопередачи	71,72
- теплопроводности	62
Кривая инверсии	52
Критерий Грасгофа	68,83
- Нуссельта	67
- - диффузионный	82
- Прандтля	67
- - диффузионный	83
- Рейнольдса	67,82
- Фурье диффузионный ..	83
- Эйлера	67
Критическая скорость	49
Критическая точка	37
Круговой процесс	22

М

Массовая доля	9
Массообмен	78
Массоотдача	79,81
Массопередача	79,84
Механическая работа	3
Многоступенчатое сжатие	34
Молярная доля	10
Молярная масса	6
Молярная масса смеси.....	11

Н

Насыщенный воздух.....	42
Ненасыщенный воздух.....	42

О

Объемная доля	10
Объемный КПД компрессора	33
Основное уравнение теплопередачи	71
Основное уравнение массопередачи.....	84
Основной закон теплопроводности.....	62
Относительная влажность воздуха	42

П

Пар	38
- влажный	38
- насыщенный.....	38

- перегретый.....	38
Параметры состояния	4
Паровая компрессорная холодильная установка	55,56
Паровые процессы	40,41
Паровые холодильные установки	55
Парообразование	38,39
Пароэжекторные холодильные установки	55
Парциальное давление	11
Первый закон термодинамики ..	12
Первый закон термодинамики для потока	45,46
Перегретый пар	38
Плотность.....	5
- потока излучения	69
- потока массы	79
Плотность смеси.....	11
Плотность теплового потока	61
Политропный процесс	17
Поток излучения.....	69
- массы.....	79
Правило фаз Гиббса	36
Приведенный объем.....	10
Производительность компрессора	35

Р

Работа механическая.....	3,20
Работа за цикл.....	22
Работа проталкивания.....	45
Работа, за цикл в идеальном компрессоре	34
Рабочая диаграмма	12
Рабочее тело.....	4
Равновесная концентрация	85
Равновесное состояние	12
Располагаемая работа	45,47

Расход газа при истечении.....	49
Расчетный температурный напор	50
Регенеративный теплообменник	73

С

Серое тело	69
Система	
- адиабатная	4
- закрытая	4
- замкнутая	4
- открытая.....	4
Скорость звука	35
- истечения.....	45,48
- потока	48
Смесительный теплообменник ..	73
Сопло	44,45
Степень повышения давления	25,27
- - - в компрессоре.....	33
Степень последующего расширения	20
Степень предварительного расширения	26,27
Степень сжатия	25,26,27
- - в компрессоре	33
Степень сухости влажного пара	38
Сублимация	37
Сухой насыщенный пар	38
Схема	
- абсорбционной холодильной установки.....	57
- ГТУ	29
- паровой компрессорной холодильной установки.....	56
- паросиловой установки.....	53

Т

Температура.....	5
Температура инверсии.....	51
Температурное поле.....	60
Температуропроводность.....	63
Теория подобия.....	66
Тепловая диаграмма.....	12
Тепловая проводимость стенки.....	63
Тепловой насос.....	59
Тепловой поток.....	61
Тепловой расчет теплообменника.....	74
Теплоемкость.....	8
- удельная.....	8
- - массовая.....	8
- - молярная.....	8
- - объемная.....	8
- - смеси.....	11
Теплообмен.....	60
- излучением.....	62,68
- конвективный.....	61,65
Теплообменник.....	73
- регенеративный.....	73
- рекуперативный.....	73
- смешительный.....	73
Теплоотдача.....	65
Теплопередача.....	71
Теплопроводность.....	62
Теплота.....	3
- в любом процессе.....	19
- парообразования.....	38
Теплотехника.....	3
Термический КПД цикла.....	23,24,28
Термическое сопротивление стенки.....	63
Термодинамическая система.....	3
- адиабатная.....	4
- закрытая.....	4
- замкнутая.....	4
- открытая.....	4
Термодинамическая температура.....	5
Термодинамический процесс.....	11
Термодиффузия.....	86
Термомеханические системы.....	3
Техническая термодинамика.....	3
Течение газов.....	44
Точка росы.....	42
Третий закон термодинамики.....	14
Тройная аналогия.....	84
Тройная точка.....	37

У

Удельная теплоемкость.....	8
- массовая.....	8
- - смеси.....	11
- молярная.....	8
- объемная.....	8
- - смеси.....	11
Удельный объем.....	5
Удельный расход пара.....	55
Универсальная газовая постоянная.....	6
Уравнение Ван-дер-Ваальса.....	37
- массопередачи.....	84
- состояния.....	6,37
- теплового баланса.....	74
- теплопередачи.....	6,37
- теплопроводности.....	62

Ф

Фаза.....	36,78
Фазовый переход.....	36
Функции состояния.....	6

Х

Холодильная установка	55
- - абсорбционная	55,57
- - паровая.....	55
- - - компрессорная	55,56
- - парожетторная.....	55
Холодильный коэффициент	23

Ц

Цикл.....	22
Цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты.....	30
- - с изохорным подводом теплоты.....	31
Цикл ДВС.....	24
- с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля)..	26
- с изохорно-изобарным подводом теплоты (цикл Тринклера).	27
- с изохорным подводом теплоты (цикл Отто).....	25
Цикл Карно	24
- паровой компрессорной холодильной установки ...	56
- поршневого компрессора	32

- Ренкина.....54

Ч

Числа подобия.....	66
Число подобия Грасгофа.....	68
- Нуссельта	67
- - диффузионное.....	48
- Прандтля.....	44
- - диффузионное.....	83
- Рейнольдса	67,82
- Фурье диффузионное ..	83
- Эйлера.....	67

Э

Эксергия	7
Энтальпия	7
- влажного воздуха.....	43
- влажного пара	40
- конденсата.....	39
- перегретого пара.....	40
- сухого насыщенного пара	39
Энтропия	7

СОДЕРЖАНИЕ

1. Термодинамика.....	3
1.1. Основные понятия и определения	3
1.2. Термодинамические параметры состояния и уравнение состояния для идеальных газов.....	4
1.3. Функции состояния.....	6
1.4. Теплоемкость.....	7
1.5. Газовые смеси.....	9
1.6. Общие сведения о термодинамических процессах.....	12
1.7. Основные законы термодинамики.....	13
1.8. Основные термодинамические процессы в идеальных газах...	15
1.9. Теплота, работа и изменение функций состояния в термодинамических процессах.....	20
1.10. Общие сведения о круговых процессах или циклах.....	24
1.11. Идеальные циклы тепловых двигателей.....	25
1.12. Термодинамические основы работы компрессора.....	34
1.13. Термодинамические свойства реальных газов.....	38
1.14. Водяной пар.....	40
1.15. Влажный воздух.....	44
1.16. Истечение газов и паров.....	47
1.17. Паросиловые установки.....	56
1.18. Холодильные установки.....	58
2. Основы теплообмена.....	63
2.1. Общие сведения о теплообмене.....	63
2.2. Теплопроводность.....	65
2.3. Конвективный теплообмен.....	69
2.4. Теплообмен излучением.....	72
2.5. Теплопередача и основы расчета теплообменников.....	75
2.6. Общие сведения о массообмене.....	82
Литература.....	91
Предметный указатель.....	92

Учебное издание

Чащинов Валерий Иванович

**Теплотехника для агроинженеров
в вопросах и ответах**
Ч-I
(Термодинамика и теплопередача)

Редактор Лебедева Е.М.

Подписано к печати 28.07.2009 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл.п.л. 5,69. Тираж 100 экз. Изд.№ 1458.

Издательство Брянской государственной сельскохозяйственной академии
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино,
ФГОУ ВПО «Брянская ГСХА»