

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н. И. Вавилова»

ТЕПЛОТЕХНИКА

краткий курс лекций

для студентов II курса

Направление подготовки
19.03.04 – Технология продукции и организация общественного питания

Профиль
Технология и организация ресторанного дела

Саратов 2016

УДК 536.7
ББК 31.31:31.3
К29

К29 **Теплотехника:** краткий курс лекций для студентов II курса специальности 19.03.04 Технология продукции и организации общественного питания / Сост.: Д.С. Катков, Наумова О.В. // ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2016. – 67 с.

Краткий курс лекций по дисциплине «Теплотехника» составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания. Краткий курс лекций содержит материал по теоретическим основам работы тепловых двигателей, холодильных машин и тепловых насосов, а также способам теплообмена. Направлен на формирование у студентов навыков в области расчета теплового и холодильного оборудования, теоретических основ его функционирования, происходящих в нем процессов и их использования в профессиональной деятельности.

УДК 536.7
ББК 31.31:31.3

© Катков Д.С., 2016
© ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2016

Введение.

Рациональное использование теплоты в сельском хозяйстве и промышленном производстве невозможно без знания основных законов теплотехники и теории теплопередачи.

Различают два вида использования теплоты – энергетическое и технологическое.

Энергетическое использование теплоты основывается на процессах, преобразующих теплоту в механическую работу. Эти процессы изучаются технической термодинамикой.

Термодинамика представляет собой физическую теорию и изучает закономерности тепловой формы движения материи.

Наука, изучающая закономерности теплообмена между телами, называется теорией теплопередачи. Техническая термодинамика и теория теплопередачи составляют теоретическую часть теплотехнической науки.

Краткий курс лекций по дисциплине «Теплотехника» предназначен для студентов по направлению подготовки 35.03.06 Агроинженерия.

Лекция 1

ВВОДНАЯ ЛЕКЦИЯ. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И СТРУКТУРА КУРСА ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Определение предмета теплотехники как науки.

Теплотехника – это область науки и техники, занимающаяся вопросами получения, преобразования и использования энергии.

Слово «*Термодинамика*» происходит от греческого «therme» – тепло и «dynamis» – сила, движение, вместе – «движущая сила тепла».

В зависимости от круга рассматриваемых вопросов различают техническую, химическую, лучистого тепла и физическую термодинамику.

Техническая термодинамика – наука, изучающая законы преобразования и эффективность взаимного преобразования теплоты и работы, она непосредственно связана с процессами, протекающими в тепловых двигателях и установках, позволяет оценить их эффективность, а также найти рациональные основы для их построения. Техническая термодинамика является теоретической основой расчета, проектирования и совершенствования тепловых двигателей, компрессорных, сушильных и холодильных установок, воздухо- и паропроводов.

1.2. Основные понятия и определения технической термодинамики.

Энергия – это количественная мера движения различных форм материи.

Рабочее тело – это вещество, посредством которого происходит взаимное превращение одного вида энергии в другой.

Идеальным газом называется газ, состоящий из упругих молекул, между которыми не действуют силы взаимного притяжения, причем объем, занимаемый молекулами, незначителен по сравнению с объемом межмолекулярного пространства, т.е. молекулы можно рассматривать как материальные точки. Примером идеального газа могут служить газы, это продукты сгорания в ДВС, воздух в компрессоре, водяной пар, находящийся в воздухе.

Реальным газом называется газ, между молекулами которого действуют силы взаимного притяжения и их размерами нельзя пренебречь. Примером реального газа служат пары жидкостей, это водяной пар в паровых машинах, пары рабочего тела в холодильных установках и т.д.

Вопросы для самоконтроля

- 1) История формирования и понятие теплотехники как науки.
- 2) Что изучает техническая термодинамика? Понятие термодинамической системы, теплоты, работы. Понятие равновесного состояния термодинамической системы.
- 3) Понятие рабочего тела. Идеальные и реальные газы. Приведите примеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

Лекция 2

ПАРАМЕТРЫ И УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕГО ТЕЛА. СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ И ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

2.1. Параметры состояния рабочего тела.

Давлением рабочего тела называют величину среднерезультирующего усилия от ударов молекул, приходящуюся на единицу поверхности и действующую по нормали к ней.

Различают абсолютное и избыточное давление.

Под **избыточным давлением** понимают разность между абсолютным давлением и давлением окружающей среды.

Прибор для измерения избыточного давления называют **манометром**.

Если давление газа в сосуде превышает давление окружающей среды, то **абсолютное давление равно**:

$$p_a = p_m + p_b$$

где p_m – давление газа в сосуде по манометру;

p_b – давление окружающей среды по барометру.

В технике единицей измерения давления служит **паскаль**.

В системе «Си»:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$$

$$1 \text{ Н} = 0,1 \text{ кг} = 100 \text{ гр}$$

Температура – это мера интенсивности теплового движения молекул вещества.

В лабораторных и промышленных условиях температуру измеряют жидкостными термометрами, термопарами и пирометрами.

Температуру измеряют либо по термодинамической шкале Кельвина (К) (в системе «Си»), либо по международной практической шкале Цельсия (°С).

Соотношение температур T , К и t , °С, следующее:

$$T = t + 273,15.$$

Удельный объем – это объем, занимаемый единицей массы вещества.

Если однородное тело массой M занимает объем V , то его удельный объем равен:

$$v = V/M, \text{ [м}^3 / \text{кг]}.$$

2.2. Уравнения состояния газов.

На основании законов Бойля – Мариотта, Шарля и Гей – Люссака и основного уравнения молекулярно-кинетической теории газов выводится **уравнение состояния для 1 кг идеального газа (уравнение Клапейрона)**:

$$p v = R T,$$

Уравнение состояния для произвольной массы идеального газа M :

$$pV = MRT,$$

Уравнение состояния для 1 киломоля газа (уравнение Клапейрона – Менделеева):

$$p\mu\nu = \mu RT,$$

где $\mu\nu$ – объем одного киломоля идеального газа, $\mu\nu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$;

R – газовая постоянная, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$;

μR – универсальная газовая постоянная, $\text{кДж} / (\text{кмоль} \cdot \text{К})$;

2.3. Смеси идеальных газов и способы их задания.

Давление, которое оказывает при этом каждый компонент смеси на стенки сосуда, называется *парциальным*.

По *закону Дальтона*, давление газовой смеси $P_{см}$, Па равно сумме парциальных давлений газов, входящих в смесь:

$$p_{см} = \sum p_k,$$

где p_k – парциальное давление газа в смеси, Па.

Газовая смесь может быть задана массовыми, объемными и мольными долями.

Если смесь из двух газов и количество смеси $M_{см}$, кг, то массовая доля первого газа m_1 равна отношению массы газа, находящегося в смеси M_1 , к массе газовой смеси $M_{см}$.

$$m_1 = \frac{M_1}{M_{см}}.$$

$$\sum m_k = 1.$$

Аналогично, если мы имеем газовую смесь, состоящую из двух газов, объем которой равен $V_{см}$, м^3 , то объемные доли компонентов смеси будут соответственно равны:

$$r_1 = \frac{V_1}{V_{см}}, r_2 = \frac{V_2}{V_{см}}, \sum r_k = 1.$$

2.4. Теплоемкость газов и газовых смесей.

Теплоемкостью газа называют количество теплоты, которое необходимо подвести к 1 кг газа, чтобы изменить его температуру на 1 К.

Обозначают:

теплоемкость C , $\text{кДж}/\text{К}$;

удельная теплоемкость c :

массовая c , $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

объемная c' , $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

молярная μc , $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

Теплоемкость газов зависит от процесса, физических свойств (атомности), структуры, влажности газа и от температуры.

Удельная теплоемкость обозначается:

в процессе при $p = \text{const}$ (изобарная):

массовая c_p ; объемная c'_p ; молярная μc_p ;

в процессе при $v = \text{const}$ (изохорная):

массовая c_v ; объемная c'_v ; молярная μc_v .

Формула Майера:

$$c_p - c_v = R;$$

$$\mu c_p - \mu c_v = \mu R;$$

$$\frac{c_p}{c_v} = k; \quad \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = k;$$

где R – индивидуальная газовая постоянная;

μR – универсальная газовая постоянная, 8314 Дж/(кмоль·К);

22,4 – объем одного киломоля при нормальных условиях, м³/кмоль;

ρ – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;

k – показатель адиабаты. Он всегда больше единицы, т.к. $c_p > c_v$ и $\mu c_p > \mu c_v$.

Удельную теплоемкость газовой смеси подсчитывают по выражениям:

$$\text{массовую } c_{см} = \sum c_k m_k ;$$

$$\text{объемную } c'_{см} = \sum c'_k r_k ;$$

$$\text{молярную } \mu c_{см} = \sum \mu c_k r_k ;$$

В данных выражениях c_k и c'_k могут быть постоянными истинными и средними теплоемкостями.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Давление как параметр состояния рабочего тела – понятие, единицы измерения, средства измерения.
- 2) Температура как параметр состояния рабочего тела – понятие, единицы измерения, средства измерения.
- 3) Характеристические уравнения состояния идеального газа. Физический смысл универсальной и индивидуальной газовых постоянных.
- 4) Способы задания газовых смесей. Расчетные выражения.
- 5) От каких факторов зависит величина теплоемкости газа?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

Лекция 3

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И ФОРМЫ ЕЕ ПЕРЕДАЧИ

3.1. Первый закон термодинамики.

Формулировка первого закона термодинамики: энергия, подводимая к рабочему телу в форме теплоты, в конечном итоге идет на изменение внутренней энергии тела и на совершение внешней работы.

Для закрытых систем первый закон термодинамики, можно записать в следующем виде:

для произвольного количества рабочего тела

$$Q = \Delta U + L,$$

В данном случае, поскольку центр массы рабочего тела не перемещается, внешняя энергия рабочего тела $E_в$ – будет величиной постоянной, и ее изменение будет равно нулю.

Для 1 кг рабочего тела

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

где $Q, q, \Delta U, \Delta u, L, l$ – теплота, изменение внутренней энергии, работа. Эти величины могут иметь различные знаки.

3.2. Внутренняя энергия, энтальпия и энтропия как функции состояния.

В технической термодинамике под **внутренней энергией** принято понимать сумму энергии движения молекул (поступательного и вращательного), энергии колебаний атомов внутри молекулы, а также потенциальной энергии взаимодействия между молекулами (для реальных газов).

Внутренняя энергия – U , Дж – является экстенсивным свойством газа, т.е. зависит от массы. Поэтому для большей определенности внутреннюю энергию газа относят к 1 кг массы газа.

$$u = \frac{U}{M}.$$

В незамкнутом процессе:

$$\Delta u = c_v dT = c_v (T_2 - T_1).$$

3.3. Теплота и работа как формы передачи энергии.

Работа в термодинамике так же, как и в механике, определяется произведением силы, действующей на рабочее тело, на путь ее действия.

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

Теплота, Q , Дж – есть произведение теплового потенциала T на изменение тепловой координаты s (энтропии).

$$Q = \int_1^2 T dS; dQ = T dS.$$

Рассмотренные величины U , Q , и L имеют одинаковую размерность (Дж), но физические понятия, определяющие эти величины глубоко различны.

Внутренняя энергия U представляет собой функцию состояния; если рабочее тело изолировано, то запас его энергии не может быть изменен. Изменение количества энергии в рабочем теле может произойти только в случае, если рабочее тело вступит во взаимодействие с другими телами, передавая им часть своей энергии и воспринимая ее от них.

Эта передача энергии может быть осуществлена только двумя способами: теплообменом или посредством работы. Суммарные количества теплоты и работы определяют количество энергии, переданное в процессе от одного тела к другому.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Первый закон термодинамики: формулировки, математическое описание.
- 2) Понятие внутренней энергии. Единицы измерения. Внутренняя энергия как функция параметров состояния рабочего тела. Определение ΔU в термодинамических процессах.
- 3) Понятие работы в технической термодинамике. Единицы измерения. Работа как функция процесса. Определение работы в термодинамических процессах P - v -диаграмма.
- 4) Понятие теплоты в технической термодинамике. Единицы измерения. Теплота как функция процесса. Определение теплоты в термодинамических процессах T - S -диаграмма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

Лекция 4

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

4.1. Методика исследования термодинамических процессов.

При изучении термодинамических процессов идеальных газов должны быть решены две задачи: первая задача сводится к определению уравнения процесса, устанавливающего закономерность изменения состояния рабочего тела в процессе; вторая – к выявлению особенностей преобразования подведенного к рабочему телу количества теплоты и распределения ее между изменением внутренней энергии и совершаемой рабочим телом работой.

Основой решения первой задачи является уравнение первого закона термодинамики, записанное при соблюдении условий, присущих рассматриваемому процессу, и уравнения состояния идеального газа.

Для решения второй задачи определяют изменение внутренней энергии. Для всех процессов она определяется одинаково:

$$du = c_v dT. \quad (4.1)$$

Если известна теплоемкость c_v , то

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1). \quad (4.2)$$

4.2. Изохорный процесс.

Изохорный процесс

Изохорный процесс происходит при нагревании или охлаждении газа в постоянном объеме.

Соотношение между параметрами состояния в изохорном процессе в соответствии с **законом Шарля** (давление газа фиксированной массы и фиксированного объема прямо пропорционально его температуре) для идеальных газов будет

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

т.е. давление всегда остается пропорциональным температуре.

Работа при $dv = 0$ не совершается, и $l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0$.

При нагревании газа $q > 0$, его давление и температура повышаются, а при охлаждении $q < 0$ – уменьшаются. Так как в изохорном процессе $l = 0$, то теплота, подводимая к рабочему телу, определяется из выражения:

$$q = \Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1).$$

Распределение теплоты в изохорном процессе выражается схемой (рисунок 4.4), которая показывает, что вся теплота, подведенная к рабочему телу, $q > 0$, расходуется на изменение внутренней энергии.

4.3. Изобарный процесс.

Изобарный процесс

Изобарный процесс происходит при нагревании или охлаждении газа при постоянном давлении.

По *закону Гей – Люссака* (при постоянном давлении объем постоянной массы идеального газа пропорционален абсолютной температуре) изменение объема в процессе с постоянным давлением прямо пропорционально изменению температуры, т.е.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Изменение внутренней энергии в изобарном процессе определяют по выражению

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1).$$

Работа газа в изобарном процессе определяется выражением

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1). (*)$$

Если $c_p = const$, то

$$q_p = C_p(T_2 - T_1) = h_2 - h_1.$$

Из данного выражения видно, что теплота, подведенная к рабочему телу в изобарном процессе, идет на увеличение энтальпии.

4.4. Изотермический процесс.

Изотермический процесс

Изотермический процесс происходит при расширении или сжатии газа при постоянной температуре. Изотермический процесс протекает при условии $dT=0$, следовательно, в этом процессе $du=0$ и $dh=0$.

Соотношение между начальными и конечными параметрами в изотермическом процессе определяется *законом Бойля-Мариотта* (при постоянной температуре и массе идеального газа произведение его давления и объема постоянно):

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Работа газа в изотермическом процессе может быть получена из выражения:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} RT \frac{dv}{v} = RT \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = RT \ln \frac{v_2}{v_1},$$

$$q = T(s_2 - s_1).$$

4.5. Адиабатный процесс.

Адиабатный процесс

Адиабатный процесс происходит при расширении или сжатии газа без теплообмена с внешней средой. Адиабатный процесс протекает при условии $ds=0$ и $q=0$.

Уравнения адиабатного процесса $pv^k = const$.

Здесь k – показатель адиабаты. $k = \frac{c_p}{c_v}$. Причем k всегда больше 1.

Соотношение между параметрами состояния в адиабатном процессе может быть получено по уравнению адиабаты с учетом уравнения состояния газа:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

При $dq=0$ первый закон термодинамики для адиабатного процесса примет вид

$$dl = - du.$$

Работа в адиабатном процессе совершается только за счет изменения внутренней энергии и определяется по выражению:

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

4.6. Политропные термодинамические процессы.

Политропными процессами называются процессы, происходящие при постоянной теплоемкости и удовлетворяющие уравнению $pv^n = const$, где n – **показатель политропы**. Этот показатель может принимать значения $n = \pm \infty$, но для данного процесса является величиной постоянной.

Таким образом, уравнение политропы запишется

$$pv^n = const.$$

При определенных значениях n уравнение политропы соответствует уравнениям рассмотренных раньше четырех основных термодинамических процессов:

Если $n = \pm \infty$ $v = const$ – процесс переходит в изохорный;
 $n = 0$ $p = const$ – процесс переходит в изобарный;
 $n = 1$ $pv = const$ – процесс переходит в изотермический;
 $n = k$ $pv^k = const$ – процесс переходит в адиабатный.

Если $k = n$, то соотношения начальных и конечных параметров политропного процесса примут вид

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Изменение внутренней энергии находится по формуле общей для всех процессов

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1).$$

Работа расширения газа в политропном процессе:

$$l = \frac{p_1 v_1 - p_2 v_2}{n-1} = \frac{R(T_1 - T_2)}{n-1} = \frac{p_1 v_1}{n-1} (1 - T_2 / T_1).$$

Количество подведенной или отведенной теплоты в процессе можно определить с помощью уравнения первого закона термодинамики:

$$q = \Delta u + l = c_v(T_2 - T_1) + \frac{R(T_1 - T_2)}{n-1} = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1).$$

Вопросы для самоконтроля

- 1) Изохорный процесс, его расчет и анализ в p - v и T - s – координатах. Схема распределения теплоты.
- 2) Изобарный процесс, его расчет и анализ в p - v и T - s – координатах. Схема распределения теплоты.
- 3) Изотермический процесс, его расчет и анализ в p - v и T - s – координатах. Схема распределения теплоты.
- 4) Адиабатный процесс, его расчет и анализ в p - v и T - s – координатах. Схема распределения теплоты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

Лекция 5

ВОДЯНОЙ ПАР - РЕАЛЬНЫЙ ГАЗ.

5.1. Основные понятия и определения.

Паром называется реальный газ, находящийся в состоянии, близком к сжижению (конденсации).

Водяной пар получается при испарении или кипении воды. Испарение жидкости может происходить с открытой поверхности при любой температуре. С повышением температуры процесс испарения ускоряется, но сущность его остается той же, и только при достижении определенных условий происходит качественное изменение всего процесса парообразования, жидкость начинает кипеть.

Температурой кипения называется температура, при которой давление насыщения становится равным внешнему давлению на жидкость. Температура кипения зависит от внешнего давления, с увеличением внешнего давления температура кипения возрастает.

Насыщенным паром называется пар, находящийся в динамическом равновесии с одноименной жидкостью.

Влажным насыщенным паром называется насыщенный пар, содержащий в себе одноименную жидкость.

Сухим насыщенным паром называется пар, не содержащий в себе одноименной жидкости, имеющий температуру, равную температуре кипения жидкости при данном давлении.

Состояние сухого насыщенного пара неустойчивое, и при подводе к нему теплоты температура его повышается, давление увеличивается, **пар становится перегретым**.

5.2. Процесс парообразования в p - v , T - s - диаграммах.

На рисунках 5.1, 5.2, 5.3 показан процесс парообразования в p - v , T - s и h - s - диаграммах.

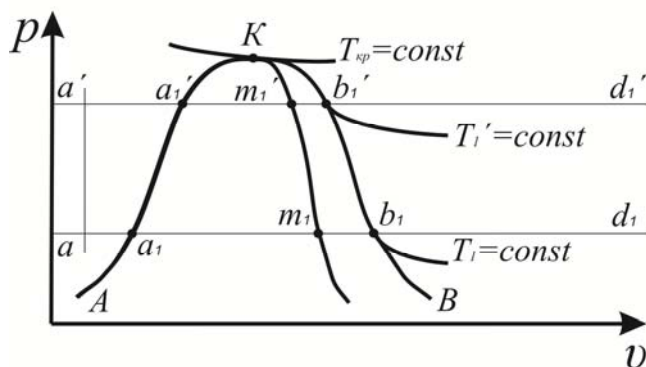


Рисунок 5.1.

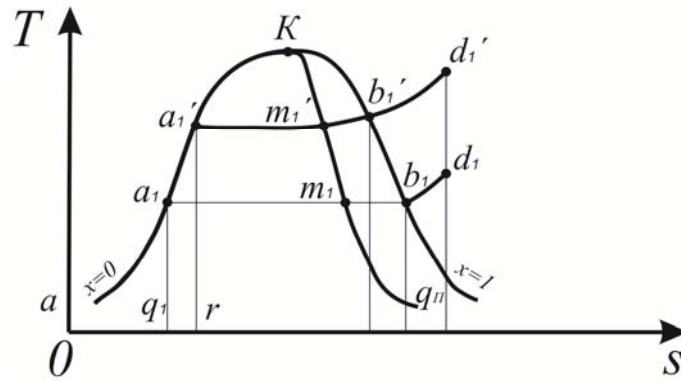


Рисунок 5.2.

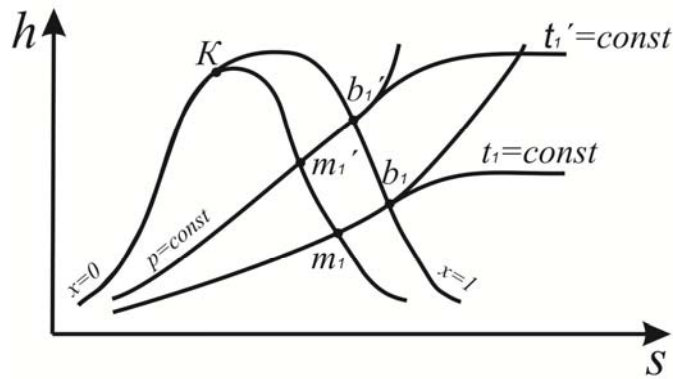


Рисунок 5.3.

На изобаре $p_2, p_1 = const$ нанесены :

a, a' – состояние воды при $t=0^\circ\text{C}$;

a_1, a_1' – состояние кипящей воды;

m_1, m_1' – состояние влажного насыщенного пара со степенью сухости $x_m = const$;

b_1, b_1' – состояние сухого насыщенного пара, $x = 1$;

d_1, d_1' – состояние перегретого пара;

обозначение точек с индексом «'» соответствует давлению $p_2 = const$

Вопросы для самоконтроля

1) Водяной пар. Что называется водяным паром? В чем заключается сущность кипения? Температура кипения.

2) Динамическое равновесие. Насыщенный пар. Влажный насыщенный пар, сухой насыщенный пар, перегретый пар.

3) Процесс парообразования в $p-v$ и $T-s$ – координатах. Теплота парообразования. Параметры критического состояния водяного пара.

4) Термодинамические процессы водяного пара в $h-s$ – диаграмме. Расчет основных термодинамических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: Учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Сарат. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 6

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ – СМЕСЬ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ.

6.1. Влажный воздух как смесь идеальных газов.

Влажным воздухом называется парогазовая смесь, состоящая из сухого воздуха и водяных паров. Знание его свойств необходимо инженеру для расчета систем отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха, сушильных установок, так как влажный воздух является рабочим телом при сушке сельскохозяйственной продукции, в вентиляционных установках, а также в теплотехнике и хладотехнике.

Влажный воздух называют ненасыщенным, если пар в нем перегретый, и **насыщенным**, если пар в нем насыщенный. Насыщенный влажный воздух – это воздух, содержащий максимальное количество водяного пара при данной температуре.

Влажный воздух называют перенасыщенным, если пар в нем влажный, т.е. это воздух, у которого давление паров воды больше давления насыщения при данной температуре.

Температурой точки росы называется температура, до которой необходимо охладить ненасыщенный влажный воздух при постоянном давлении, чтобы содержащийся в нем перегретый пар стал насыщенным.

6.2. Характеристики и параметры состояния влажного воздуха.

При изучении влажного воздуха рассматривают абсолютную и относительную влажность.

Абсолютной влажностью называют количество водяного пара, содержащееся в одном кубическом метре влажного воздуха. Так как объем пара в смеси равен объему всей смеси, то абсолютная влажность может быть выражена в виде плотности пара в смеси ρ_{Π} , кг/м³ :

$$\rho_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{V_{CM}},$$

где M_{Π} – масса пара в смеси, кг;

V_{CM} – объем влажного воздуха, м³.

Относительной влажностью воздуха φ (%) (определяется психрометром) называют отношение абсолютной влажности ρ_{Π} к максимально возможной влажности ρ_{max} , когда воздух при данных давлении и температуре насыщен водяным паром.

$$\varphi = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{max}} = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_H},$$

где ρ_H – плотность насыщенного сухого пара, кг/ м³.

Удельным влагосодержанием влажного воздуха d , кг/кг, г/кг называют отношение массы водяного пара M_{Π} , содержащегося во влажном воздухе к массе сухого воздуха $M_{С.В.}$.

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_{C.B.}} = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{C.B.}}$$

Относительным влагосодержанием влажного воздуха ψ , % называют отношение влагосодержания воздуха в данном состоянии к влагосодержанию насыщенного воздуха:

$$\psi = d / d_H.$$

6.3. $h-d$ – диаграмма влажного воздуха.

Параметры влажного воздуха можно определить графически, пользуясь **$h-d$ – диаграммой влажного воздуха**, предложенной в 1918 г. Леонидом Константиновичем Рамзиным (рисунок 6.1.)

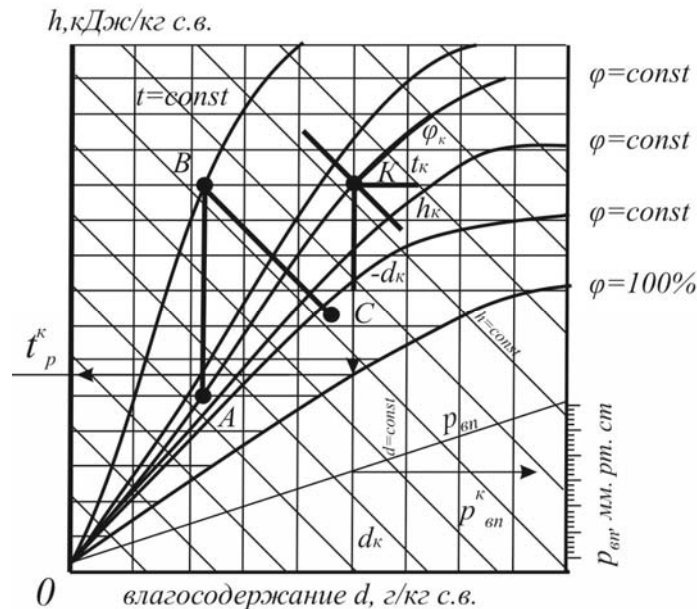


Рисунок 6.1. $h-d$ – диаграмма влажного воздуха.

На этой диаграмме вертикальные линии – линии влагосодержания d , г/кг; линии, наклоненные к вертикальным линиям под углом 45° , являются линиями постоянных энтальпий.

ε – угловой коэффициент, Q_u / W – абсолютная влажность.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Влажный воздух. Определение ненасыщенного и перенасыщенного влажного воздуха. Точка росы.
- 2) Удельное и относительное влагосодержание.
- 3) Абсолютная и относительная влажность.
- 4) $h-d$ диаграмма влажного воздуха и определение его параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Саратов. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 7

ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗА И ПАРА.

7.1. Основные понятия и определения.

Течение газа рассматривается при следующих условиях:

1. Течение рассматривается как равновесный процесс преобразования энергии давления в кинетическую энергию движения.

2. Течение газа установившееся, непрерывное, процесс течения адиабатный (т.к. скорость течения среды достаточно высока).

Каналы, в которых происходит преобразование потенциальной энергии в кинетическую, т.е. газ или пар расширяется (давление его падает) и увеличивается скорость движения, называются **соплами**. Сопла предназначены для разгона потока.

Каналы, в которых происходит увеличение давления газа или пара и уменьшение скорости движения, называются **диффузорами**. Диффузоры предназначены для торможения потока.

7.2. Основные уравнения потока газа.

Термодинамический поток – это подвижная система, которая перемещается в пространстве и относится к открытым термодинамическим системам.

При анализе термодинамики потока принимают следующие допущения:

1. Поток одномерный, термодинамические параметры и скорость постоянны по всему сечению.

2. Поток стационарный, т.е. в любом сечении все величины, характеризующие течение остаются постоянными во времени.

3. Поток является сплошным.

Приращение кинетической энергии в обратимом процессе течения газа или пара в соплах называется **располагаемой** или **технической работой**:

$$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = -\int_1^2 v dp = -l_0,$$

где w_1 и w_2 – начальная и конечная скорость истечения, м/с;

v – удельный объем, м³/кг;

p – давление, Па;

l_0 – располагаемая работа, Дж.

Масса рабочего тела, протекающего в секунду через данное сечение канала, называется **секундным расходом газа или пара**, M , кг/с.

$$M = \frac{fw}{v},$$

Если f – площадь поперечного сечения канала, а w и v – скорость и удельный объем потока газа или пара в этом сечении, то fw представляет собой объем, который протекает через данное сечение канала, т.е. **секундный объемный расход газа или пара**. При неразрывности течения $Mv = fw = const.$

Из курса физики известно, что величина $a^2 = k\nu p$, где a – скорость звука в том сечении канала, в котором параметры потока имеют значения p и ν ; a **называют местной скоростью звука**. С изменением параметров течения потока газа или пара по каналу изменяется и местная скорость звука вдоль канала.

Учитывая, что $a^2 = k\nu p$, можно записать:

$$\frac{df}{f} = \frac{a^2 - w^2}{kpw^2} = \frac{1}{kp} \frac{1 - \frac{w^2}{a^2}}{\frac{w^2}{a^2}} dp,$$

$$\frac{df}{f} = \frac{1}{kp} \left(\frac{1}{M_*^2} - 1 \right) dp,$$

где отношение скорости газа к местной (в данном сечении) скорости звука $w/a = M_*$ называют числом Маха

7.3. Расчетные соотношения скорости и расхода газа при истечении.

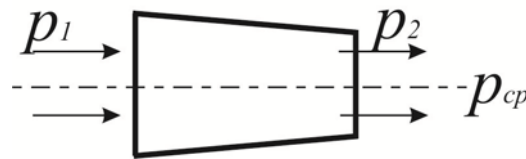


Рисунок 7.1.

Рассмотрим истечение рабочего тела из суживающегося сопла в среду с давлением p_{cp} (рисунок 7.1).

В случае, если давление газа в выходном сечении сопла p_2 равно давлению среды p_{cp} расход определится отношением $\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_{cp}}{p_1}$. Построим график зависимости секундного

расхода от отношения давлений $\frac{p_{cp}}{p_1}$; $M = f \frac{p_{cp}}{p_1}$; когда $\frac{p_{cp}}{p_1} = 0$ и $\frac{p_{cp}}{p_1} = 1$, тогда $M = 0$.

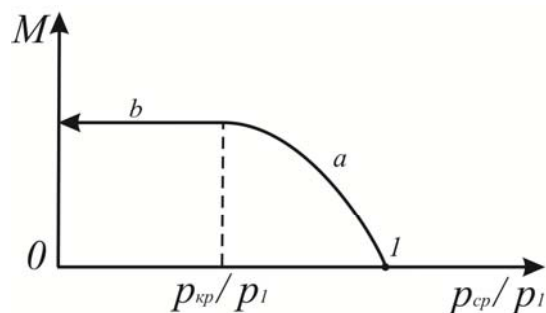


Рисунок 7.2.

График (рисунок 7.2) показывает, что при неизменном давлении газа на входе в сопло p_1 расход M увеличивается с уменьшением давления среды p_{cp} , а следовательно,

$$M = f \frac{p_{cp}}{p_1} \text{ (кривая } a).$$

Увеличение расхода M происходит до тех пор, пока M не достигнет максимального значения $M = M_{max}$, при $\frac{p_{cp}}{p_1}$.

Дальнейшее уменьшение давления среды p_{cp} и отношения $\frac{p_{cp}}{p_1}$ ведет к уменьшению расхода M , и, когда давление среды $p_{cp} = 0$, истечение прекращается, $M = 0$ (кривая c).

Опыт показывает, что секундный расход растет с уменьшением давления среды p_{cp} до достижения максимального значения, дальнейшее уменьшение p_{cp} не вызывает изменения количества вытекающего газа (линия b). Это объясняется тем, что уменьшение давления среды по достижении максимума расхода и дальнейшее уменьшение p_{cp} не влияют на давление в выходном сечении сопла p_2 , а поэтому секундный расход, достигнув своего максимума, остается неизменным и дальше до достижения $p_{cp} = 0$.

Давление в выходном сечении суживающегося сопла, которому соответствует $M = M_{max}$, называется критическим и обозначается $p_{кр}$.

Критическое давление – наименьшее давление, которое может установиться в выходном сечении суживающегося сопла.

Отношение $\frac{p_{кр}}{p_1}$ называется **критическим отношением давления**. Этому отношению соответствует $M = M_{max}$.

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

Зная значение показателя адиабаты k для различных газов, можно определить для них $\beta_{кр}$:

для двухатомных газов $k = 1,4$; $\beta_{кр} = 0,528$;

для перегретого пара $k = 1,3$; $\beta_{кр} = 0,546$;

для насыщенного пара $k = 1,135$; $\beta_{кр} = 0,577$.

Скорость истечения, соответствующая критическому давлению в суживающихся соплах, называется критической и обозначается $w_{кр}$.

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k-1}} p_1 v_1.$$

Следует заметить, что максимальный секундный расход и критическая скорость изменяются с изменением начальных параметров p_1 и v_1 и k .

При $\beta > \beta_{кр}$ скорость течения меньше скорости звука (дозвуковая) ($w > a$), в этом случае следует применить простое суживающееся сопло. При $\beta = \beta_{кр}$ скорость течения равна местной скорости звука – это предельный случай применения простого сопла. При $\beta < \beta_{кр}$ применяют *комбинированное сопло Лавалья*.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Понятие термодинамического потока, уравнение неразрывности потока. Располагаемая работа, секундный расход газа.
- 2) Местная скорость звука.
- 3) Число Маха.
- 4) Комбинированное сопло Лавалья
- 5) Критическое давление, критическая скорость, критическое отношение давления.
- 6) Сопла и диффузоры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Саратов. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 8

ОСОБЕННОСТИ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ГАЗА И ПАРА.

8.1. Понятие дросселирования и его особенности.

Дросселирование – необратимый процесс протекания газа (пара) через местное сопротивление, в результате которого понижается давление газа без совершения им технической работы. Дросселирование происходит в не полностью открытых вентилях, задвижках, кранах, клапанах, диафрагмах, капиллярных трубках.

Процесс дросселирования характеризуется понижением давления и практически постоянством энтальпии $h_2 = h_1 = const$.

При дросселировании идеального газа $du = 0$; $dh = 0$; $dt = 0$.

В реальном газе (паре) внутренняя энергия зависит от объема, поэтому у пара изменяется и внутренняя энергия, и температура, отсюда $du \neq 0$; $dT \neq 0$.

8.2. Эффект Джоуля-Томсона.

Эффект понижения температуры рабочего тела при дросселировании называют **дроссель-эффектом** и широко используют при получении низких температур, а также при сжижении газов. Это явление в 1852 г. было открыто Джоулем и Томсоном и называется эффектом Джоуля-Томсона. Для идеального газа эффект Джоуля-Томсона равен нулю, т.е. $t = const$ (так как изменение температуры происходит за счет взаимодействия атомов [в реальных газах]).

Для количественной оценки эффекта Джоуля-Томсона введено понятие **дифференциального дроссельного эффекта** α_h :

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{\partial T_h}{\partial p_h}.$$

Это отношение бесконечно малого изменения температуры к бесконечно малому изменению давления газа при $h = const$.

Так как dp всегда больше нуля, то:

при $\alpha_h > 0$ температура после дросселирования уменьшается;

при $\alpha_h < 0$ температура после дросселирования возрастает.

Состояние газа при $\alpha_h = 0$, называется точкой инверсии эффекта Джоуля-Томсона, а температура, при которой эффект меняет знак, называется **температурой инверсии**.

Дифференциальный дроссель-эффект используется для определения температуры газа после дросселирования при малом уменьшении давления.

При значительном снижении давления изменение температуры газа оценивают **интегральным дроссель-эффектом Джоуля-Томсона**:

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp.$$

Вопросы для самоконтроля

- 1) Дросселирование. Сущность процесса.
- 2) Эффект Джоуля-Томсона.
- 3) Методы оценки Эффекта Джоуля-Томсона (дифференциальный и интегральный дроссель-эффекты).
- 4) Температура инверсии. Кривая инверсии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Сарат. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 9

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СЖАТИЯ ГАЗА В ПОРШНЕВОМ КОМПРЕССОРЕ

9.1. Процесс сжатия газа в $p-v$ и $T-s$ – диаграммах.

При термодинамических исследованиях условно считают, что поршень перемещается без трения, а в своем крайнем левом положении подходит вплотную к крышке цилиндра. Клапаны открываются и закрываются мгновенно. Такой *компрессор называется идеальным*.

Диаграмма идеального компрессора имеет следующий вид.

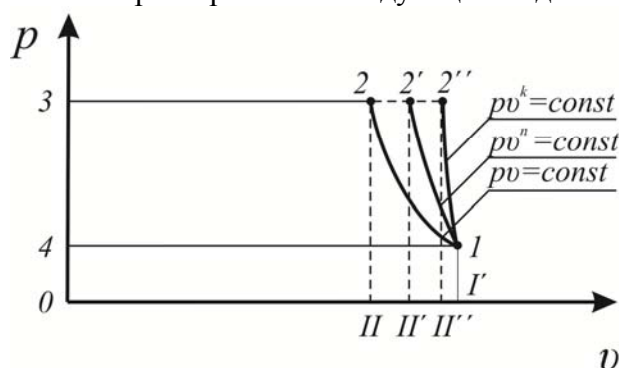


Рисунок 9.1. Процесс сжатия газа в $p-v$ – диаграмме.

Газ в цилиндре можно сжимать в зависимости от охлаждения по следующим законам (рисунок 9.1): $(1-2)$ – изотермы; $(1-2')$ – политропы; $(1-2'')$ – адиабаты.

При сжатии по закону адиабаты $(1-2'')$ теплообмен с внешней средой отсутствует (цилиндр идеально изолирован), сообщаемая газу от первичного двигателя работа расходуется на увеличение внутренней энергии рабочего тела, в результате чего его температура возрастает.

При сжатии по закону изотермы $(1-2)$ количество теплоты, эквивалентное работе, передаваемой газу от первичного двигателя, в результате охлаждения цилиндра отводится от рабочего тела, и его температура остается постоянной, $t = \text{const}$.

При сжатии по закону политропы $(1-2')$, когда $1 < n < k$, часть работы, передаваемая от двигателя газу, расходуется на увеличение внутренней энергии, вследствие чего его температура возрастает, а оставшая часть работы двигателя не используется, так как в результате охлаждения от рабочего тела отводится теплота, эквивалентная этой части работы.

9.2. Многоступенчатое сжатие.

Политропное и адиабатное сжатие сопровождается повышением температуры, что наглядно видно на $T-s$ – диаграмме. При больших степенях сжатия конечная температура становится недопустимо высокой, и может произойти возгорание масла, что приведет к выходу из строя компрессора.

При необходимости получения высокого давления газа компрессоры выполняются многоступенчатыми, причем после каждой ступени газ (рабочее тело) охлаждается в холодильнике при постоянном давлении до исходной температуры.

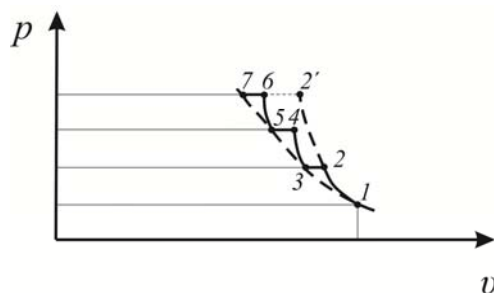


Рисунок 9.4. p - v – диаграмма компрессора с трехступенчатым сжатием.

Из p - v – диаграммы компрессора с трехступенчатым сжатием (рисунок 9.4) видно, что промежуточное охлаждение рабочего тела существенно уменьшает затраты технической работы на привод компрессора и приближает процесс сжатия к изотермическому сжатию: $(7 - 5 - 3 - 1)$ – изотерма.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какой компрессор называют идеальным?
- 2) Дайте анализ и сравнение в p - v – диаграмме компрессоров, работающих по адиабатному, политропному и изотермическому процессам сжатия.
- 3) Для чего применяют многоступенчатое сжатие?
- 4) Приведите p - v – диаграмму компрессора с многоступенчатым сжатием и дайте ее анализ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие / В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Саратов. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 10

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ЦИКЛ КАРНО.

10.1. Второй закон термодинамики.

Второй закон термодинамики, как и первый, является опытным законом. Он устанавливает закономерности, в соответствии с которыми возникают те или иные процессы, направления этих процессов и пределы до которых они совершаются.

Формулировки второго закона термодинамики:

1. Тепловой двигатель без холодного источника, т.е. полностью превращающий в работу всю полученную от горячего источника теплоту, называется двигателем 2-го рода. Двигатель 2-го рода невозможен (Планк 1852г.)
2. Некомпенсированный переход (т.е. без затраты определенной работы) теплоты от тела с меньшей температурой к телу с большей температурой невозможен. (Клаузиус 1850г.)

10.2. Прямой и обратный цикл Карно.

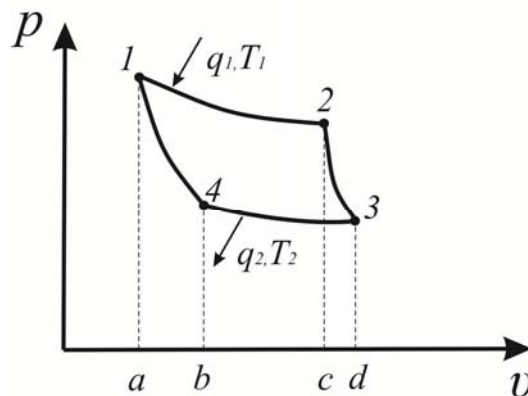


Рисунок 10.1. p - v – диаграмма прямого цикла Карно.

Прямой цикл Карно скомбинирован из четырех процессов, двух изотерм ($1 - 2$) и ($3 - 4$) (рисунок 10.1), по которым подводится и отводится теплота, и двух адиабат ($2 - 3$) и ($4 - 1$), по которым осуществляются процессы расширения и сжатия. Полезно использованная теплота определяется как разность между теплотой, подведенной к рабочему телу q_1 и отведенной в холодильник q_2 :

$$q = q_1 - q_2 = l_{\text{у}}; \quad \eta_t = \frac{l_{\text{у}}}{q_1};$$

Подставив значения q_2 и q_1 – для изотермического сжатия и расширения, с некоторыми допущениями получим

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

КПД цикла Карно зависит лишь от величины отношения температур и не зависит от свойств рабочего тела.

Термический КПД тем больше, чем больше значение T_1 и тем меньше значение T_2 ;

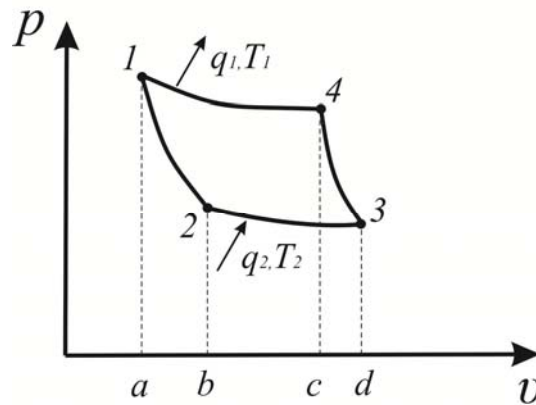


Рисунок 10.4. p - v – диаграмма обратного цикла Карно.

Обратный цикл Карно является идеальным циклом холодильных машин.

На рисунке 10.4 показан обратный цикл Карно, который, как и прямой цикл, состоит из четырех процессов, но процессы протекают в обратной последовательности, против часовой стрелки. В этом случае полная работа цикла складывается из суммарной отрицательной работы сжатия (большей по абсолютной величине) и суммарной положительной работы расширения (меньшей по абсолютной величине), т.е.

$$l_u = \sum(-l_{сж}) + \sum(+l_{рас}), \text{ где } \sum(-l_{сж}) > \sum(+l_{рас}).$$

Степень совершенства этого цикла оценивается холодильным коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_u} = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Уравнение показывает, что холодильный коэффициент увеличивается с понижением температуры T_1 повышением температуры T_2 .

Вопросы для самоконтроля

- 1) Второй закон термодинамики, его формулировки.
- 2) Понятие о циклах. Показатели эффективности прямых и обратных циклов.
- 3) Прямые и обратные циклы. Термический КПД цикла.
- 4) Холодильный коэффициент. Формула определения. Физический смысл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Сарат. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 11

ИДЕАЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ.

11.1. Цикл Отто.

Цикл Отто является теоретической основой бензиновых карбюраторных и газовых двигателей со сжатием горючей смеси, ее воспламенением от постороннего источника и быстрым сгоранием при нахождении поршня у верхней мертвой точки.

Цикл состоит из двух адиабатных и двух изохорных термодинамических процессов.

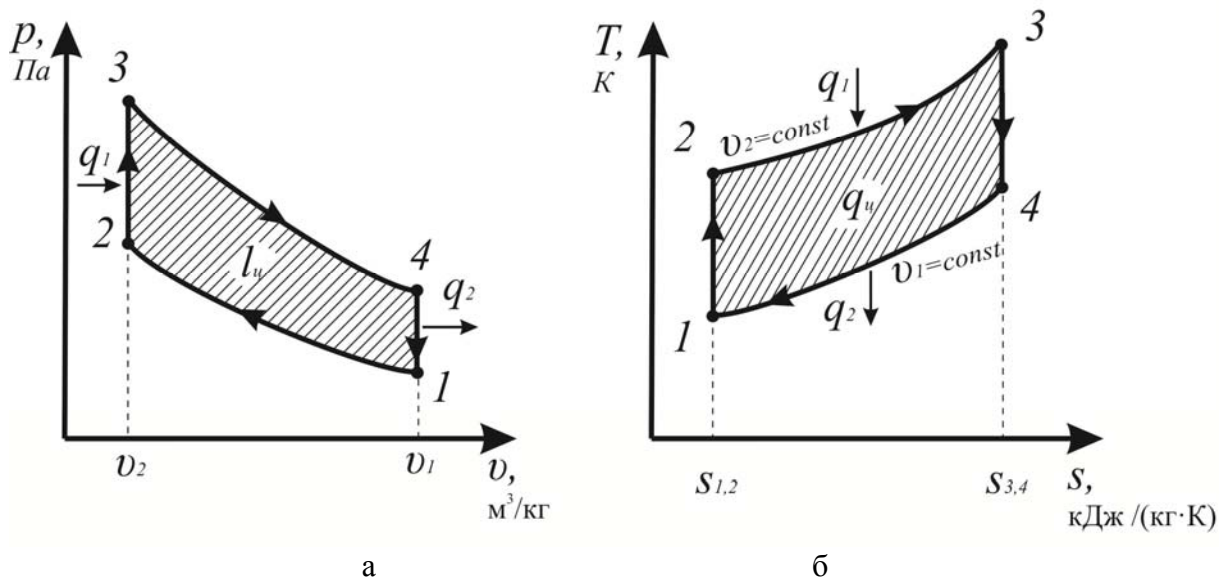


Рисунок 11.1. p - v (а) – и T - s (б) – диаграммы цикла ДВС с подводом теплоты при $v = const$.

Из данной формулы видно, что термический КПД цикла ДВС с подводом теплоты при $v = const$ возрастает при увеличении степени сжатия ϵ и зависит от физических свойств рабочего тела (коэффициент k).

11.2. Цикл Дизеля.

Цикл Дизеля является теоретической основой компрессорных дизелей со сжатием воздуха компрессорным распыливанием топлива, его воспламенением о теплоты сжатого воздуха с медленным сгоранием при перемещающемся поршне.

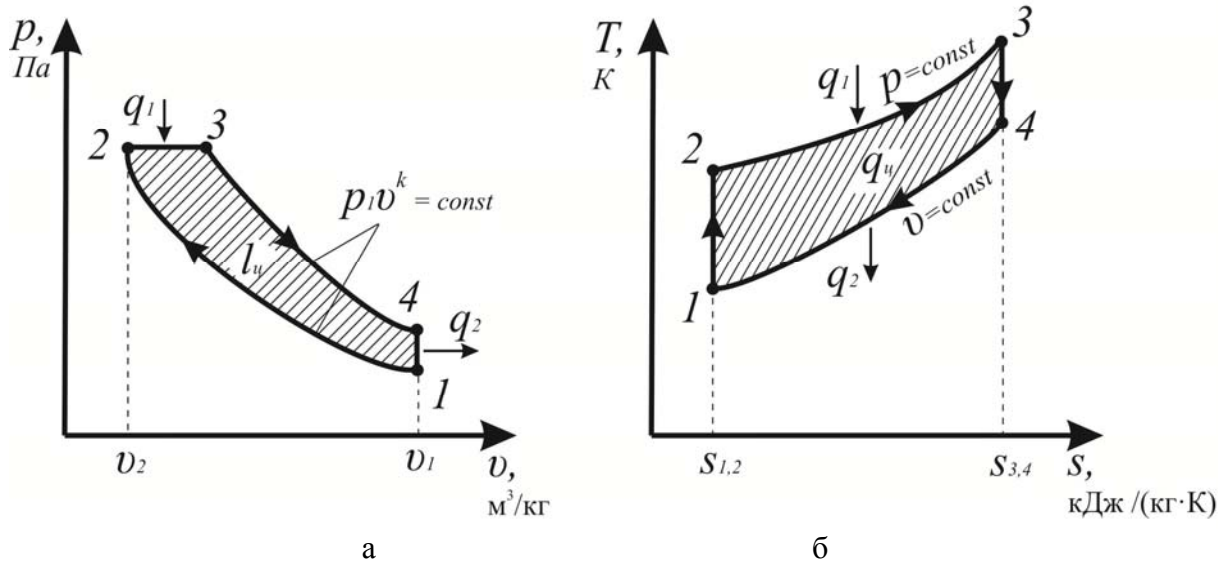


Рисунок 11.2. p - v (а) – и T - s (б) – диаграммы цикла ДВС с подводом теплоты при $p = const$.

Термический КПД этого цикла рассчитывается по следующей формуле

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

Из данного уравнения следует, что термический КПД тем выше, чем выше степень сжатия ε и чем меньше степень предварительного расширения ρ .

11.3. Цикл Тринклера.

Цикл Тринклера является теоретической основой всех современных бескомпрессорных дизелей со сжатием воздуха, бескомпрессорным распыливанием топлива, его воспламенением и сгоранием при нахождении поршня у верхней мертвой точки.

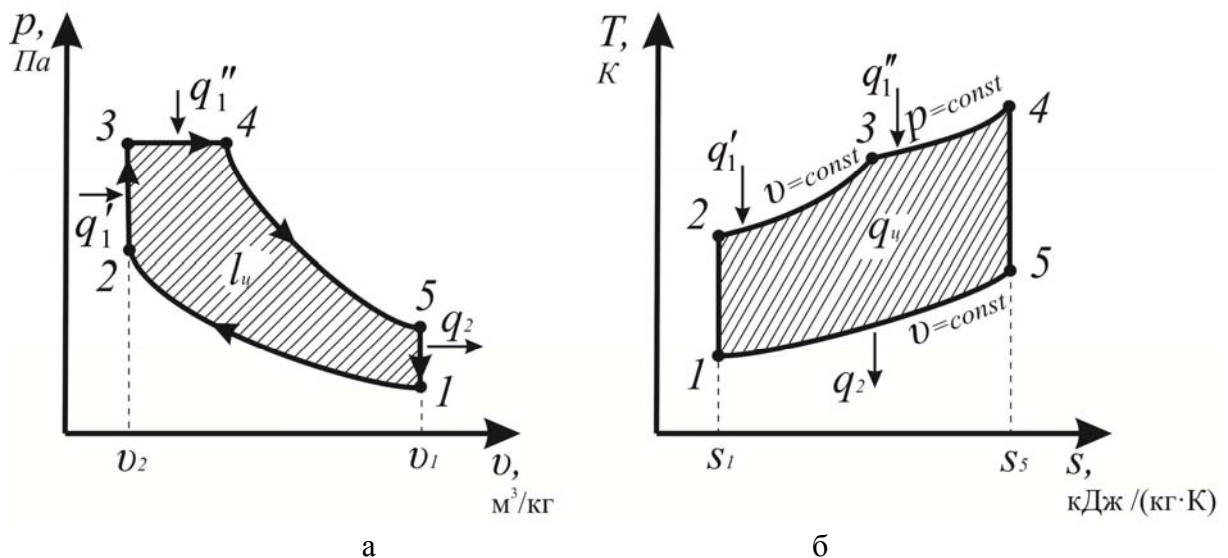


Рисунок 11.3. p - v (а) – и T - s (б) – диаграммы цикла ДВС с подводом теплоты при $p = const$ и $v = const$.

Термический КПД цикла определяется по выражению

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

Из этого выражения видно, что термический КПД цикла Тринклера повышается с увеличением степени сжатия ε и степени повышения давления λ , а увеличение степени предварительного расширения ρ отрицательно влияет на величину термического КПД.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Цикл Отто. Анализ цикла в p - v и T - s – диаграмме. Степень сжатия. Термический коэффициент полезного действия.
- 2) Цикл Дизеля. Анализ цикла в p - v и T - s – диаграмме. Степень предварительного расширения. Термический коэффициент полезного действия.
- 3) Цикл Тринклера. Анализ цикла в p - v и T - s – диаграмме. Термический коэффициент полезного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие / В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко. – Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Саратов. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 12

ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК.

12.1. Назначение ГТУ.

Газотурбинная установка (ГТУ) – тепловой двигатель, в котором получение механической энергии вращения вала происходит при отсутствии возвратно-поступательного движения непосредственно за счет использования кинетической энергии газа.

12.2. Цикл ГТУ.

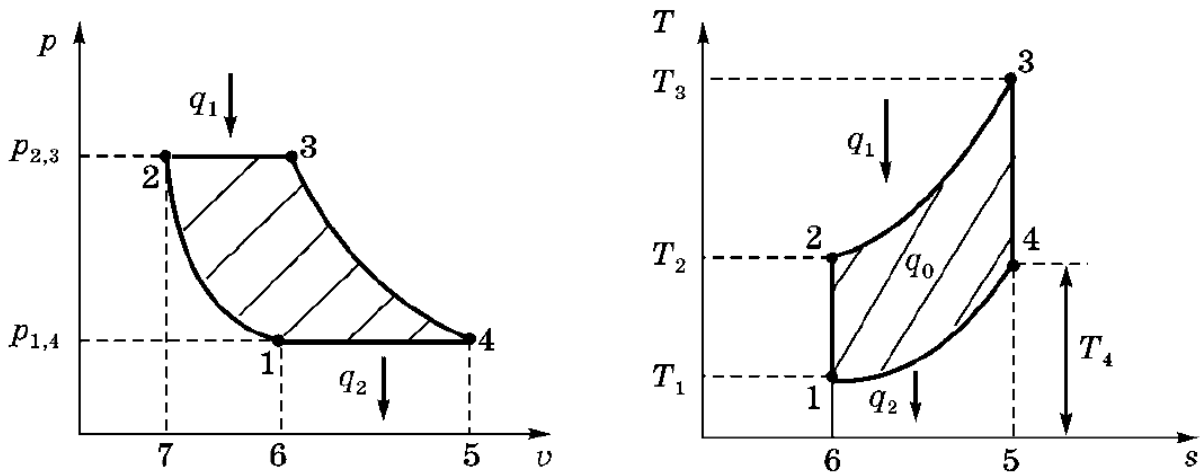


Рисунок 12.1. Цикл ГТУ в p - v - и T - S - координатах при $p = \text{const}$:

1–2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре; 2–3 – изобарный подвод теплоты q_1 к сжатому газу (сгорание топлива в камере сгорания); 3–4 – адиабатное расширение газов в турбине; 4–1 – условный изобарный процесс (отвод теплоты q_2 в атмосферу).

Идеальный цикл ГТУ с подводом теплоты при $p = \text{const}$ представлен в p - v - и T - S -координатах на рисунке 12.1:

1–2 – адиабатное сжатие рабочего тела в компрессоре.

2–3 – изобарный процесс подвода теплоты q_1 к сжатому газу, что соответствует количеству теплоты, образующейся при сгорании топлива в камере сгорания.

3–4 – адиабатное расширение рабочего тела (продуктов сгорания в газовой турбине).

4–1 – изобарный процесс отвода теплоты q_2 в атмосферу.

Термодинамический КПД цикла ГТУ

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

Из данного уравнения следует, что при одинаковых степенях сжатия КПД ГТУ равен КПД поршневого двигателя, но при существенно меньшем максимальном давлении цикла. КПД ГТУ больше КПД поршневого двигателя с подводом теплоты при $p = \text{const}$.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Схема ГТУ,
- 2) Принцип работы ГТУ.
- 3) Показатели эффективности ГТУ.
- 4) Термодинамический цикл ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. – Саратов: Сарат. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. – 196с. – ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 13

ПАРОСИЛОВЫЕ УСТАНОВКИ. ЦИКЛ РЕНКИНА.

13.1. Назначение ПСУ.

Паросиловые установки (ПСУ) работают по прямому циклу и служат для получения электрической энергии за счет совершения работы в паровой турбине при расширении пара.

Рабочим телом в ПСУ является пар, обычно водяной, который образуется при нагревании жидкости в паровом котле, установленном в топке.

13.2. Цикл Ренкина.

Идеальными циклами паровых машин являются цикл Карно и цикл Ренкина.

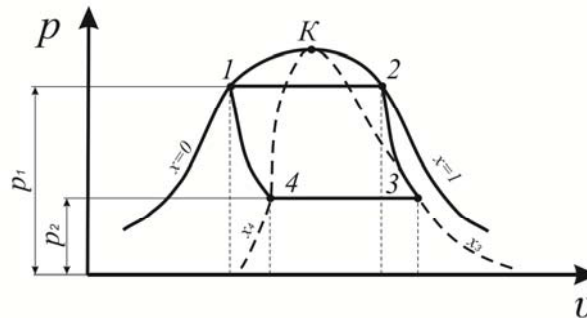


Рисунок 13.1. Цикл Карно для паровой машины в p - v – координатах.

На рисунке 13.1 представлен цикл Карно для паровой машины.

Процесс (1 – 2) изотермно-изобарный процесс парообразования с теплотой r_1 , температурой T_1 и давлением $p_1 = const$. В точке 1 степень сухости $x_0 = 0$, в точке 2 степень сухости $x_2 = 1$. Процесс (2 – 3) – адиабатное расширение, в точке 3 степень сухости x_3 . Процесс (3 – 4) – изобарно-изотермический процесс сжатия влажного пара с отводом теплоты r_2 , т.е. конденсация пара. Процесс (4 – 1) – адиабатное сжатие парожидкостной смеси. В точке 4 степень сухость x_1 .

Определив значение полезной теплоты из T - s – диаграммы найдем значение термического КПД цикла

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = \frac{r_1(x_1 - x_0) - r_2(x_2 - x_3)}{r_1(x_1 - x_0)} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

За основу теоретического цикла ПСУ принимается цикл Ренкина. Цикл Ренкина отличается от цикла Карно для насыщенного пара следующим: полной конденсацией отработанного пара, что позволяет вместо громоздкого энергоемкого компрессора применить компактный экономичный насос, а также использованием перегретого пара, что обеспечивает более высокий термический КПД паросиловых установок.

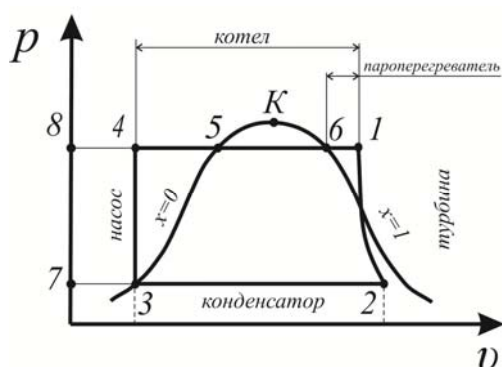


Рисунок 13.2. Цикл Ренкина в $p-v$ – координатах

Рассмотрим цикл Ренкина (рисунок 13.2) в $p-v$ – координатах.

В паровом котле 1 вода при постоянном давлении нагревается до температуры насыщения (кипения t_n) (линия 4 – 5), затем в результате подвода теплоты q происходит изобарно-изотермический процесс парообразования (линия 5 – 6).

В пароперегревателе 2 происходит перегрев пара (изобарный процесс 6 – 1) – повышение температуры пара выше t_n от состояния сухого насыщенного пара (точка 6) до заданной температуры нагрева (точка 1).

В паровой турбине 3 пар расширяется адиабатно (линия 1 – 2) от давления пара p_1 до давления p_2 в конденсаторе.

Допустимая степень сухости отработанного пара (точка 2) должна быть не менее 0,88. В конденсаторе 4 при постоянных давлении и температуре этот пар полностью конденсируется ($x_2=0$), отдавая теплоту охлаждающей воде.

Далее конденсат насосом 5 изохорно (в виду несжимаемости воды) перекачивается в паровой котел (линия 3 – 4).

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{l_q}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3},$$

Вопросы для самоконтроля

- 1) ПСУ на насыщенном водяном паре, теоретическая основа ($p-v$ -диаграмма),
- 2) Показатели эффективности ПСУ на насыщенном водяном паре и принцип ее работы.
- 3) ПСУ на перегретом водяном паре, теоретическая основа ($p-v$ -диаграмма цикла Ренкина).
- 4) Показатели эффективности ПСУ на перегретом водяном паре и принцип ее работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. — ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. — М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. — 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. — Саратов: Саратов. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. — 196с. — ISBN 5-7011-0285-8.

Лекция 14

ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК.

14.1. Схема, принцип действия пароконпрессорной холодильной установки.

На рисунке 14.1 дана схема *пароконпрессорной холодильной установки*.

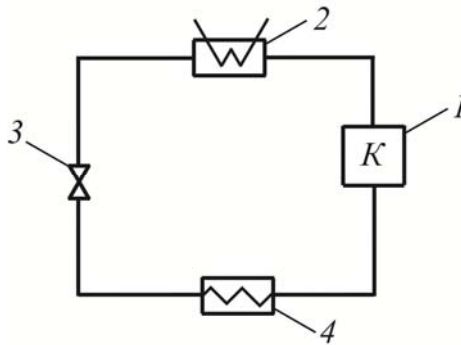


Рисунок 14.1. Схема пароконпрессорной холодильной установки: 1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – редукционный вентиль; 4 – испаритель.

Компрессор 1, засасывает пары хладагента из испарителя 4, при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для аммиака) и в состоянии, близком к сухому насыщенному пару, сжимает их адиабатно, а затем нагнетает в конденсатор 2.

В конденсаторе пары конденсируются в жидкость с температурой $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Охлаждающая вода конденсатора нагревается при этом за счет теплоты парообразования хладагента, а далее хладагент поступает в редукционный вентиль 3, где происходит дросселирование (адиабатное расширение), сопровождающееся падением давления и температуры. После дросселирования парожидкостная смесь поступает в испаритель 4.

В зависимости от величины открытия вентилей 3 устанавливается более высокая или более низкая температура хладагента. Хладагент испаряется и с паросодержанием, близким к сухому насыщенному пару, снова поступает в компрессор 1.

14.2. Идеальный цикл пароконпрессорной холодильной установки.

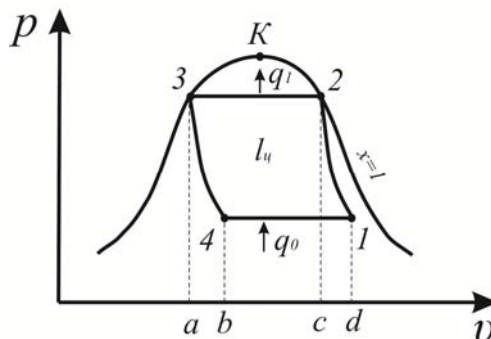


Рисунок 14.2. Цикл пароконпрессорной холодильной установки в $p-v$ – координатах.

Цикл парокомпрессорной холодильной установки состоит из четырех процессов (рисунок 14.2): (1 – 2) – адиабатное сжатие; (2 – 3) – изобарно-изотермная конденсация с отводом теплоты q_1 ; (3 – 4) – адиабатное дросселирование при $h = const$; (4 – 1) – изобарно-изотермное испарение хладагента с подводом теплоты q_0 .

Степень совершенства цикла парокомпрессорной холодильной установки оценивается холодильным коэффициентом

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_c} = \frac{q_0}{q_1 - q_0} = \frac{T_0}{T_1 - T_0}.$$

Вопросы для самоконтроля

- 1) Цикл (р-в) парокомпрессорной холодильной установки.
- 2) Схема парокомпрессорной холодильной установки. Холодильный коэффициент.
- 3) Холодильный коэффициент парокомпрессорной холодильной установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.
2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

Лекция 15

ЦИКЛЫ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК.

15.1. Схема, принцип действия идеальной теплонаносной установки.

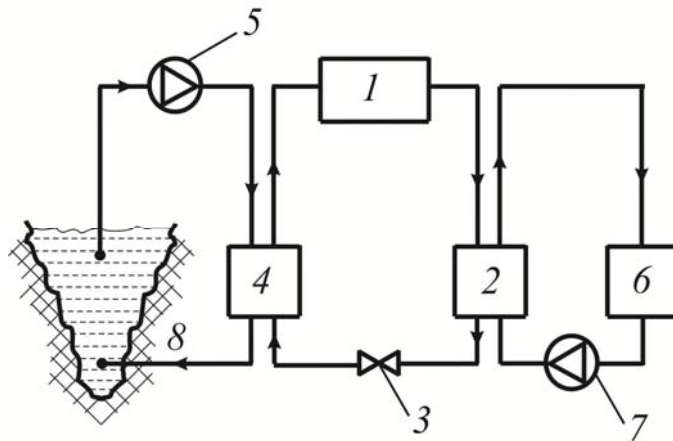


Рисунок 15.1. Принципиальная схема теплового насоса: 1 – компрессор; 2 – конденсатор; 3 – редукционный вентиль; 4 – испаритель; 5 – насос первичного источника теплоты; 6 – потребитель теплоты; 7 – насос; 8 – источник низкопотенциальной энергии (водоем, скважина, геотермальный источник).

Принцип действия теплового насоса заключается в следующем (рисунок 15.1). Насосом 5 через испаритель 4 парокомпрессорной холодильной установки прокачивается вода из водоема 8, теплота которой идет на испарение хладагента. Далее хладагент поступает в компрессор 1, где в результате адиабатного сжатия ему сообщается теплота в количестве равном работе за цикл $l_{ц}$. Хладагент в виде перегретого пара с теплотой поступает в конденсатор 2, где он превращается в жидкость, отдавая свою теплоту теплоносителю, циркулирующему между конденсатором 2 и потребителем теплоты 6 с помощью насоса 7.

15.2. Термодинамический цикл идеальной теплонаносной установки.

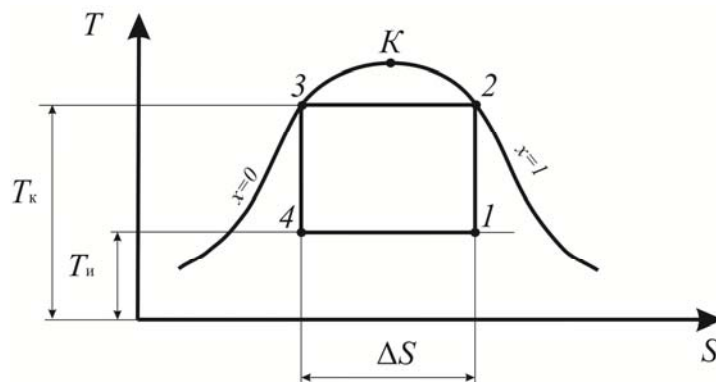


Рисунок 15.2. Идеальный термодинамический цикл теплового насоса в T-S – координатах.

Идеальный термодинамический цикл теплового насоса скомбинирован из следующих процессов (рисунок 15.2):

1-2 – изоэнтروпийное (адиабатное) сжатие влажного пара от давления в испарителе до давления в конденсаторе с повышением температуры от T_i до T_k за счет совершения работы сжатия в компрессоре;

2-3 – изобарно-изотермическая конденсация со снижением энтальпии в результате отвода теплоты q_k от рабочего тела в конденсаторе;

3-4 – изоэнтропийное (при постоянной энтропии) расширение испаряющегося рабочего тела в дросселе до состояния p_i , T_i со снижением энтальпии;

4-1 – изобарно-изотермическое испарение с повышением энтальпии в следствие подвода теплоты q_i в испарителе.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Тепловой насос. Схема, принцип действия.
- 2) Цикл теплового насоса в T-S-диаграмме.
- 3) Показатели его эффективности термодинамического цикла теплового насоса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.
2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. — ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. — М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. — 328 с.

Лекция 16 ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА

16.1. Основные понятия и определения.

Теория тепломассообмена – это учение о процессах переноса и распространения теплоты и вещества, наблюдаемых в природе и технике. На основе этого учения решается ряд вопросов конструирования и создания машин и особенно силовых установок.

Теплообмен – самопроизвольный необратимый процесс распространения теплоты в жидких, твердых и газообразных средах, или переноса теплоты от одной среды к другой.

Теплообмен может происходить только при наличии разности температур, при этом если процесс происходит в одном теле, то теплота самопроизвольно переходит от точек с более высокой температурой к точкам с более низкой. При теплообмене между телами это положение сохраняется.

Под **температурным полем** понимают совокупность мгновенных значений температур во всех точках изучаемого пространства.

Математически уравнение температурного поля записывается следующим образом:

$$t = f(x, y, z, \tau).$$

Температурное поле, которое изменяется во времени, называется **нестационарным**. Если температурное поле не изменяется во времени, то такое поле называется **стационарным**.

Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn при условии, что $\Delta n \rightarrow 0$, называется **температурным градиентом** (К/м) (рис.16.1), то есть:

$$\lim \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right)_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad} t$$

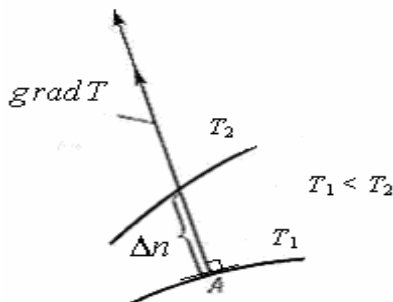


Рисунок 16.1. Температурный градиент.

Температурный градиент есть вектор, за положительное направление которого принимается направление в сторону возрастания температуры.

Количество тепла, переносимого в единицу времени называется **тепловым потоком** Q . Тепловой поток, отнесённый к единице площади сечения или поверхности, называется **удельным тепловым потоком**, или **тепловой нагрузкой сечения** или поверхности нагрева:

$$q = \frac{Q}{F},$$

где Q – тепловой поток, Вт; F – поверхность тела, м²; q – удельный тепловой поток, Вт/м².

Величина q является вектором, направление которого противоположно направлению вектора $\text{grad } t$, так как тепловая энергия самостоятельно распространяется всегда только в сторону убывания температуры.

16.2. Способы распространения теплоты.

Теплообмен является сложным процессом и включает (в зависимости от физической сущности, природы распространения теплоты) три способа переноса теплоты теплопроводность, конвективный теплообмен и теплообмен излучением.

Теплопроводностью называется явление переноса теплоты путём непосредственного соприкосновения между частицами тела или между телами с различной температурой. Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц тела.

Конвекция – это явление переноса теплоты при перемещении объёмов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой.

Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью. Совместный процесс конвекции и теплопроводности называется **конвективным теплообменом**.

Тепловое излучение – это процесс распространения тепловой энергии путём электромагнитных волн. При этом происходит двойное превращение энергии – тепловая энергия излучающего тела переходит в лучистую, а лучистая энергия, поглощаясь телом, переходит в тепловую.

Теплообмен между теплоносителями через разделяющую их стенкой называют **теплопередачей**. Процесс теплопередачи, включает в себя перенос теплоты теплоотдачей и излучением от одной среды к поверхности стенки, теплопроводностью через стенку и снова теплоотдачей (и излучением) от противоположной поверхности стенки к другой среде.

В природе и технике многие процессы переноса теплоты сопровождаются переносом вещества. Например, при испарении воды в воздух помимо теплообмена имеет место и перенос образовавшегося пара. В общем случае перенос пара осуществляется как молекулярным, так и конвективным способами. Совместный конвективный и молекулярный перенос массы называется **конвективным массообменом**.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Что называется теплообменом? Назовите известные вам виды теплообмена.
- 2) Что называется теплопроводностью? Каков механизм переноса теплоты теплопроводностью?
- 3) Что называется температурным полем?
- 4) Какие виды температурных полей вам известны?
- 5) Сформулируйте понятие температурного градиента.
- 6) Что называется тепловым потоком, удельным тепловым потоком? Их обозначение, размерность, направление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.
2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Тепломассообмен [Текст]: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Тепломассообмен» для слушателей курсов профессиональной переподготовки/ А. И. Кирюшатов, О.Г. Брюнина; ФГОУ ВПО "Саратовский ГАУ". - Саратов : 2011– 159 с.

Лекция 17 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ

17.1. Механизм теплопроводности. Закон Фурье.

Процесс распространения теплоты вообще и процесс теплопроводности в частности неразрывно связан с распределением температуры в теле.

Исследуя теплопроводность твёрдых тел, французский ученый Жан Батист Жозеф Фурье в 1822г. установил, что *количество переданного теплопроводностью тепла пропорционально падению температуры и площади сечения, перпендикулярного направлению теплового потока:*

$$Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} F,$$

или

$$q = -\lambda \text{ grad } t.$$

Приведенная формула и есть математическое выражение закона Фурье. Множитель пропорциональности λ , Вт/(м·К), в этом уравнении называют *коэффициентом теплопроводности*.

Коэффициентом теплопроводности численно равен удельному тепловому потоку в 1 Вт при градиенте температур в 1 градус через поверхность толщиной в 1 м.

$\text{grad } t = 1$, т.е. при условии, что изменение температуры на единицу длины составляет один градус.

17.2. Расчет теплового потока теплопроводностью при стационарном режиме.

Теплопроводность однослойной плоской стенки

Рассмотрим плоскую однородную, однослойную стенку (рис. 17.1).

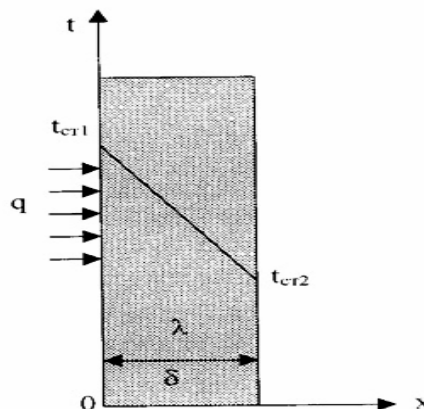


Рисунок 17.1. Распределение температуры по толщине однородной плоской стенки.

Толщина стенки δ , коэффициент теплопроводности λ . Температура на границах стенки $t_{ст1}$ и $t_{ст2}$, причем $t_{ст1} > t_{ст2}$. Тепло распространяется вдоль осей.

Плотность теплового потока определяется по формуле:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{ст1} - t_{ст2}),$$

$$t_{ст2} = -q \frac{\delta}{\lambda} + t_{ст1}, \quad (17.1)$$

или

$$q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta t}{R}.$$

Соотношение $\frac{\lambda}{\delta}$ называется **тепловой проводимостью стенки**, а $\frac{\delta}{\lambda}$ тепловым, или **термическим сопротивлением теплопроводности** R ($\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$). Последнее определяет падение температуры при прохождении удельного теплового потока, равного единице.

Из уравнения (17.1) следует, что в плоской однородной стенке при стационарной теплопроводности температура распределяется по линейному закону, причем угловой коэффициент прямой линии равен $\frac{\delta}{\lambda}$ и определяет интенсивность падения температуры.

Теплопроводность многослойной плоской стенки

Рассмотрим теплопроводность плоской многослойной стенки, состоящей из трёх слоёв плотно прилегающий друг к другу (рис. 17.2). Температурное поле многослойной стенки изобразится ломаной линией.

Каждый слой имеет свою толщину δ и коэффициент теплопроводности λ . При стационарном тепловом режиме тепловые потоки через каждый из слоёв стенки одинаковы.

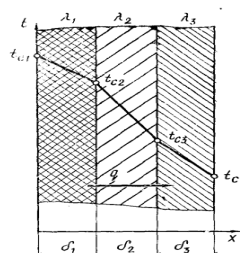


Рисунок 17.2. Плоская многослойная стенка

Перепад температур в каждом слое будет равен:

$$t_{\text{ст}1} - t_{\text{ст}2} = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}; \quad t_{\text{ст}2} - t_{\text{ст}3} = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}; \quad t_{\text{ст}3} - t_{\text{ст}4} = q \frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

Просуммировав, левые и правые части, получим:

$$t_{\text{ст}1} - t_{\text{ст}4} = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right),$$

Откуда плотность теплового потока:

$$q = \frac{t_{\text{ст}1} - t_{\text{ст}4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{\Delta t}{R_0},$$

где Δt – температурный перепад наружных поверхностей стенки;

Тепловой поток через многослойную плоскую стенку определяется по формуле:

$$Q = q F = \frac{t_{\text{ст}1} - t_{\text{ст}(n+1)}}{\sum_{i=1}^n R_i} F,$$

где i – порядковый номер слоя, n – число слоев.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Физическая сущность закона Фурье. Аналитическое выражение, анализ составляющих.
- 2) Коэффициент теплопроводности: физический смысл, от каких факторов зависит. Коэффициент теплопроводности газов, жидкостей, диэлектриков, металлов.
- 3) Как получают расчетное выражение для определения теплового потока теплопроводностью через однослойную плоскую стенку?
- 4) Как получают расчетное выражение для определения теплового потока теплопроводностью через многослойную плоскую стенку?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.

2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.

2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.

3. **Кирюшатов, А.И.** Тепломассообмен [Текст]: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Тепломассообмен» для слушателей курсов профессиональной переподготовки/ А. И. Кирюшатов, О.Г. Брюнина; ФГОУ ВПО"Саратовский ГАУ". - Саратов : 2011– 159 с.

Лекция 18 КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

18.1. Механизм теплоотдачи. Закон Ньютона-Рихмана.

Конвективный теплообмен обусловлен совместным действием конвекции и молекулярного переноса вещества.

Конвективный теплообмен между потоком жидкости или газа и поверхностью твёрдого тела называется **конвективной теплоотдачей** или просто **теплоотдачей**, при этом перенос тепла осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью.

Перенос частиц зависит от многих факторов: от природы возникновения и режима движения, рода и физических свойств жидкости, формы и размеров поверхности тела и др. Поэтому конвективный теплообмен (теплоотдача) представляет собой очень сложный процесс. При практических расчетах теплоотдачи используют **закон Ньютона-Рихмана**:

$$Q = \alpha (t_{ст} - t_{ж}) F.$$

Согласно закону Ньютона-Рихмана, тепловой поток Q от жидкости к стенке или от стенки к жидкости пропорционален поверхности теплообмена F и разности температур

$$\Delta t = t_{ст} - t_{ж},$$

где $t_{ст}$ – температура поверхности, $t_{ж}$ – температура жидкости или газа, °С.

Разность температур $t_{ст} - t_{ж}$ – называется **температурным напором**. Величины F и Δt не исчерпывают факторы, влияющие на конкретный процесс теплообмена между стенкой и жидкостью.

Конкретные условия учитываются коэффициентом пропорциональности α , называемым **коэффициентом теплоотдачи**.

В общем случае коэффициент теплоотдачи изменяется по поверхности теплообмена и уравнение для элемента поверхности запишется так:

$$\alpha = \frac{dQ}{(t_{ст} - t_{ж}) dF} = \frac{q}{t_{ст} - t_{ж}}.$$

18.2. Теория подобия.

Теория подобия – это учение о подобных явлениях. Она позволяет на основании отдельных опытов получить обобщенную зависимость и открывает возможность изучения рабочих процессов технических устройств на моделях. Термин «подобия» заимствован из геометрии, где изучается подобие геометрических фигур. У подобных геометрических фигур пропорциональны сходственные линейные элементы (длины сторон треугольника, граней призм т.п.).

Основу теории подобия физических явлений составляют три теоремы.

Первую теорему подобия формулируют так: у подобных явлений одноимённые критерии подобия численно одинаковы.

Вторая теорема подобия устанавливает возможность представления интеграла как функции от критериев подобия дифференциального уравнения.

На основании этой теоремы любая зависимость между переменными, характеризующими какое-либо явление, может быть представлена в виде зависимости между критериями подобия:

$$f(K_1; K_2, \dots, K_n) = 0,$$

где K – критерии подобия.

Зависимость такого вида называют **критериальным уравнением**, так как для всех подобных между собой явлений критерии подобия сохраняют одно и то же значение, то и критериальные зависимости для них одинаковы.

Третья теорема подобия формулируется так: подобны те явления, условия однозначности которых подобны, и критерии, составленные из условия однозначности численно одинаковы.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Что называется конвекцией, конвективным теплообменом, теплоотдачей?
- 2) Сформулируйте физическую сущность закона Ньютона-Рихмана.
- 3) Напишите аналитическое выражение закона Ньютона-Рихмана, проанализируйте составляющие.
- 4) Сформулируйте физическую сущность коэффициента теплоотдачи и укажите от каких факторов он зависит.
- 5) Сущность теории подобия.
- 6) Условия подобия.
- 7) Теоремы подобия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.
2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Тепломассообмен [Текст]: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Тепломассообмен» для слушателей курсов профессиональной переподготовки/ А. И. Кирюшатов, О.Г. Брюнина; ФГОУ ВПО "Саратовский ГАУ". - Саратов : 2011– 159 с.

Лекция 19 ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ.

19.1. Механизм переноса теплоты излучением. Законы излучения.

Излучение – это процесс распространения электромагнитных волн, испускаемых телом при преобразовании внутренней энергии тела в результате внутримолекулярных и внутриатомных возмущений в лучистую энергию.

Все виды электромагнитного излучения имеют одинаковую природу.

Для переноса энергии они не требуют проводящей среды и распространяются с одинаковой скоростью, равной скорости света.

Виды излучения различаются только частотой ν и длиной волны λ .

Теплообмен излучением представляет собой процесс взаимного излучения двух или нескольких тел, имеющих различную температуру.

Зависимость интенсивности излучения абсолютно черного тела J_0 от длины волны λ и температуры T устанавливаются **законом Планка** (Макс Карл Эрнст Людвиг Планк немецкий физик-теоретик, основоположник квантовой физики):

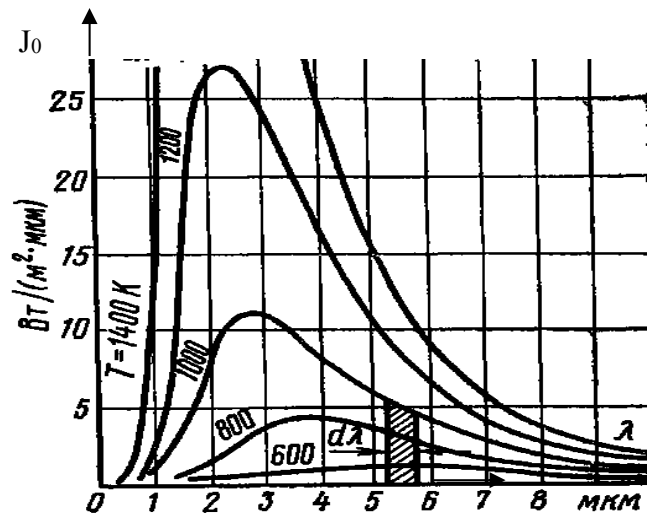
$$J_0 = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, (*)$$

где $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт·м² и $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м·К (первая и вторая постоянные Планка); e – основание натурального логарифма.

Графическое изображение закона Планка дано на рис. 19.1, откуда видно, что интенсивность излучения увеличивается с ростом температуры.

Максимум интенсивности излучения зависит от температуры и сдвигается в сторону более коротких волн. На основании **закона Вина** (Вильгельм Карл Вернер Отто Фриц Франц Вин немецкий физик, лауреат Нобелевской премии) длина волны λ_m , отвечающая максимуму интенсивности излучения связана с температурой излучающего тела уравнением:

$$\lambda_m \cdot T = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$



λ

Рисунок 19.1. Зависимость интенсивности излучения от длины волны и от температуры

Из уравнения (*) видно, что с увеличением температуры максимум интенсивности излучения будет сдвигаться в сторону коротких волн.

Йозеф Стефан (1879) (австрийский физик и математик) экспериментально, а затем Людвиг Больцман (1884) (австрийский физик-теоретик, основатель статистической механики и молекулярно-кинетической теории) теоретически установили, что излучательная способность абсолютно черного тела возрастает пропорционально четвертой степени абсолютной температуры:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Реальные тела, называемые обычно серыми телами, по интенсивности излучения отличаются от абсолютно черного тела, но **закон Стефан-Больцмана** применим и к ним, если учесть степень их черноты:

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

где E – излучательная способность серого тела; E_0 – излучательная способность абсолютно черного тела.

19.2. Расчет лучистого теплообмена между телами в прозрачной среде.

Рассмотрим *две параллельно расположенные стенки*, имеющие большую поверхность и небольшое расстояние между собой (рис. 19.2).

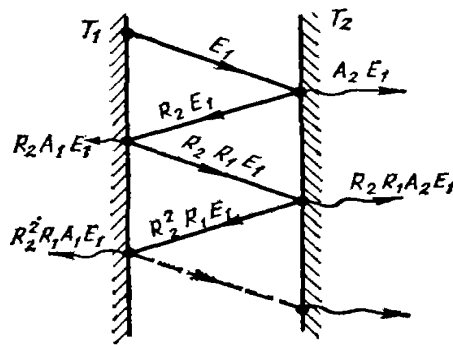


Рисунок 19.2. Схема лучистого теплообмена между двумя параллельно расположенными телами.

Излучение каждой стенки частично поглощается, частично отражается, этот процесс, многократно повторяясь, имеет затухающий характер.

Обозначим через q_1 плотность потока эффективного излучения от первой стенки ко второй, включающей как излучение первой стенки, так и все ее отражения, а через q_2 плотность потока эффективного излучения от второй стенки, к первой. Первой стенкой будет поглощено из потока q_2 : $A_1 q_2$ и отражено $(1 - A_1)q_2$, тогда:

$$q_1 = E_1 + (1 - A_1)q_2; \quad (19.1)$$

$$q_2 = E_2 + (1 - A_2)q_1. \quad (19.2)$$

Подставив (19.2) в (19.1) Получим:

$$q_1 = \frac{E_1 + E_2 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}.$$

Аналогично и для q_2 найдем:

$$q_2 = \frac{E_1 + E_2 - A_2 E_1}{A_1 + A_2 - A_1 A_2}.$$

Результирующий тепловой поток q_{1-2} равен разности q_1 и q_2 , тогда получим:

$$q_{1-2} = A_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где A_{np} – приведённая поглощательная способность.
Так как $\varepsilon = A$ и $c = \varepsilon c_0$, то можно записать:

$$q_{1-2} = \varepsilon_{np} c_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где ε_{np} – приведённая степень черноты и приведённая степень излучения,

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}.$$

Вопросы для самоконтроля

- 1) Что называется лучистым теплообменом? Что называется интенсивностью излучения?
- 2) Физическая сущность и аналитическое выражение закона Стефана-Больцмана.
- 3) Физическая сущность и аналитическое выражение закона Вина.
- 4) Физическая сущность и аналитическое выражение закона Планка.
- 5) Расчет теплообмена излучением между двумя параллельными поверхностями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.
2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Тепломассообмен [Текст]: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Тепломассообмен» для слушателей курсов профессиональной переподготовки/ А. И. Кирюшатов, О.Г. Брюнина; ФГОУ ВПО "Саратовский ГАУ". - Саратов : 2011– 159 с.

Лекция 20 ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

20.1. Теплопередача через плоские поверхности (однослойная стенка).

Теплопередачей называется передача теплоты от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю через стенку, разделяющую эти теплоносители.

Явление теплопередачи составляет основу рабочих процессов теплообменных аппаратов, а расчетные уравнения теплопередачи зависят от формы стенки, разделяющей теплоносители.

Рассмотрим теплопередачу через плоскую однослойную стенку.

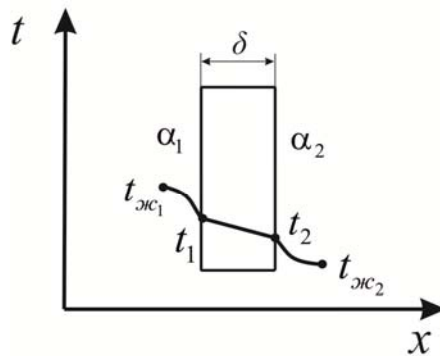


Рисунок 20.1. Схема теплопередачи через плоскую однослойную стенку

Определим температурные напоры для каждого этапа:

$$t_{жс1} - t_1 = \frac{q}{\alpha_1},$$

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

$$t_2 - t_{жс2} = \frac{q}{\alpha_2}.$$

Суммируя левые и правые части этих выражений, получим

$$t_{жс1} - t_{жс2} = q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right),$$

откуда

$$q = \frac{t_{жс1} - t_{жс2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = K(t_{жс1} - t_{жс2}),$$

где K — **коэффициент теплопередачи**, Вт/(м² · К), который представляет собой мощность удельного теплового потока, проходящего от горячей жидкости к холодной через 1 м² поверхности стенки при разности температур между жидкостями в 1 К.

Величина обратная коэффициенту теплопередачи, $\frac{1}{K} = R_0$, называется **термическим сопротивлением теплопередаче**, тогда $\frac{1}{K} = R_0 = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$,

где R_0 – общее термическое сопротивление теплопередаче равное сумме частных термических сопротивлений:

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3,$$

где R_1 – термическое сопротивление теплоотдаче от горячей жидкости к поверхности стенки; R_2 – термическое сопротивление теплопроводности стенки $R_2 = \frac{\delta}{\lambda}$, R_3 – термическое сопротивление теплоотдаче от стенки к жидкости,

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_2}.$$

20.2. Теплопередача через плоские поверхности (многослойная стенка).

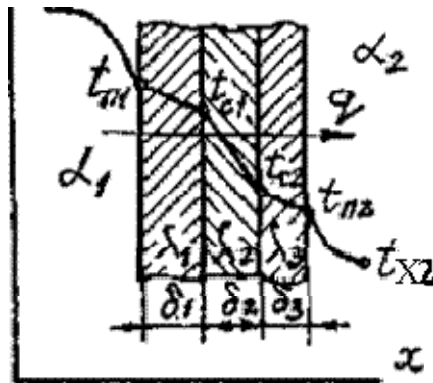


Рисунок 20.2. Схема теплопередачи через плоскую многослойную стенку

Если стенка состоит из n слоев (рисунок 20.2), при известной толщине и теплопроводности каждого слоя, по аналогии можно записать:

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} = K(t_{ж1} - t_{ж2}),$$

где $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$;

$$R_0 = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2},$$

где $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – сумма термических сопротивлений теплопроводности многослойной стенки.

Количество теплоты, переходящей от одной среды к другой через площадь F любой плоской стенки определяется по выражению

$$Q = KF(t_{ж_1} - t_{ж_2}) = \frac{F}{R_0}(t_{ж_1} - t_{ж_2}).$$

Вопросы для самоконтроля

- 1) Что называется теплопередачей?
- 2) Сформулируйте понятие коэффициента теплопередачи и полного термического сопротивления теплопередачи.
- 3) Как получают расчетное выражение для определения теплового потока при теплопередаче через однослойную плоскую стенку?
- 4) Определение теплового потока и температур на поверхности стенки и в плоскости соприкосновения слоев при теплопередаче через многослойную плоскую стенку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. **Федина, В.В.** Техническая термодинамика [Текст]: учебное пособие/ В.В. Федина, А.С. Тимофеева, Т.В. Никитченко.– Старый Оскол: ТНТ, 2015. – 144 с.
2. **Шатров, М.Г.** Теплотехника [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений/ М.Г. Шатров, И.Е. Иванов, С.А. Пришвин и др.– 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2012.

Дополнительная

1. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. – ISBN 978-5-8114-1017-0.
2. **Баскаков, А.П.** Теплотехника [Текст]: учебник для нетеплоэнергетических вузов (переработанный и дополненный) / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт, Ю.В. Кузнецов, Н.Ф. Филипповский. – М.: Издательский Дом «Бастет», 2010. – 328 с.
3. **Кирюшатов, А.И.** Тепломассообмен [Текст]: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Тепломассообмен» для слушателей курсов профессиональной переподготовки/ А. И. Кирюшатов, О.Г. Брюнина; ФГОУ ВПО "Саратовский ГАУ". - Саратов : 2011– 159 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Барилевич, В.А.** Основы технической термодинамики и теории тепломассообмена [Текст]: учебное пособие / В.А. Барилевич, Ю.А. Смирнов. — М.: ИНФРА-М, 2014. — 432 с. — ISBN 978-5-16-005771-2.
2. **Круглов, Г.А.** Теплотехника [Текст]: учебное пособие / Г.А. Круглов, Р.И. Булгакова, Е.С. Круглова. — СПб.: Издательство «Лань», 2010. — 208 с.: ил. — ISBN 978-5-8114-1017-0.
3. **Кирюшатов, А.И.** Теплотехника [Текст]: курс лекций для студентов специальностей 311300, 311400, 311500, 230100 / А.И. Кирюшатов. — Саратов: Саратов. гос. агр. ун-т. им. Н.И. Вавилова, 2001. — 196с. — ISBN 5-7011-0285-8.
4. **Кирюшатов, А.И.** Тепломассообмен [Текст]: учебно-методическое пособие по изучению дисциплины «Тепломассообмен» для слушателей курсов профессиональной переподготовки/ А. И. Кирюшатов, О.Г. Брюнина; ФГОУ ВПО "Саратовский ГАУ". - Саратов : 2011– 159 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лекция 1. Вводная лекция. Цель, задачи и структура курса дисциплины	4
1.1. Определение предмета теплотехники как науки.....	4
1.2. Основные понятия и определения технической термодинамики.....	4
Вопросы для самоконтроля.....	4
Список литературы.....	5
Лекция 2. Параметры и уравнения состояния рабочего тела. Смеси идеальных газов. Теплоемкость газов и газовых смесей	6
2.1. Параметры состояния рабочего тела.....	6
2.2. Структура Уравнения состояния газов.....	6
2.3. Смеси идеальных газов и способы их задания.....	7
2.4. Теплоемкость газов и газовых смесей.....	7
Вопросы для самоконтроля.....	8
Список литературы.....	9
Лекция 3. Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия и формы ее передачи	10
3.1. Первый закон термодинамики.....	10
3.2. Внутренняя энергия, энтальпия и энтропия как функции состояния диссертации.....	11
3.3. Теплота и работа как формы передачи энергии.....	11
Вопросы для самоконтроля.....	11
Список литературы.....	11
Лекция 4. Термодинамические процессы и их характеристики	13
4.1. Методика исследования термодинамических процессов.....	13
4.2. Изохорный процесс.....	13
4.3. Изобарный процесс.....	14
4.4. Изотермический процесс.....	14
4.5. Адиабатный процесс.....	15
4.6. Политропные термодинамические процессы.....	15
Вопросы для самоконтроля.....	16
Список литературы.....	17
Лекция 5. Водяной пар - реальный газ	18
5.1. Основные понятия и определения.....	18
5.2. Процесс парообразования в $p-v$, $t-s$ - диаграммах.....	18
Вопросы для самоконтроля.....	19
Список литературы.....	20
Лекция 6. Влажный воздух – смесь идеальных газов	21
6.1. Влажный воздух как смесь идеальных газов.....	21
6.2. Характеристики и параметры состояния влажного воздуха.....	21
6.3. $H-d$ –диаграмма влажного воздуха.....	22
Вопросы для самоконтроля.....	22
Список литературы.....	23
Лекция 7. Истечение газа и пара	24
7.1. Основные понятия и определения.....	24
7.2. Основные уравнения потока газа.....	24
7.3. Расчетные соотношения скорости и расхода газа при истечении.....	25

Вопросы для самоконтроля.....	27
Список литературы.....	27
Лекция 8. Особенности дросселирования газа и пара.....	28
8.1. Понятие дросселирования и его особенности.....	28
8.2. Эффект Джоуля-Томсона.....	28
Вопросы для самоконтроля.....	29
Список литературы.....	29
Лекция 9. Термодинамический анализ процесса сжатия газа в поршневом компрессоре.....	30
9.1. Процесс сжатия газа в $p-v$ и $T-s$ – диаграммах.....	30
9.2. Многоступенчатое сжатие.....	30
Вопросы для самоконтроля.....	31
Список литературы.....	31
Лекция 10. Второй закон термодинамики. Цикл Карно.....	32
10.1. Второй закон термодинамики.....	32
10.2. Прямой и обратный цикл Карно.....	32
Вопросы для самоконтроля.....	33
Список литературы.....	34
Лекция 11. Идеальные циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания.....	35
11.1. Цикл Отто.....	35
11.2. Цикл Дизеля.....	35
11.3. Цикл Тринклера.....	36
Вопросы для самоконтроля.....	37
Список литературы.....	37
Лекция 12. Циклы газотурбинных установок.....	38
12.1. Назначение ГТУ.....	38
12.2. Цикл ГТУ.....	38
Вопросы для самоконтроля.....	39
Список литературы.....	39
Лекция 13. Паросиловые установки. Цикл Ренкина.....	40
13.1. Назначение ПСУ.....	40
13.2. Цикл Ренкина.....	40
Вопросы для самоконтроля.....	41
Список литературы.....	41
Лекция 14. Циклы холодильных установок.....	43
14.1. Схема, принцип действия парокомперссорной холодильной установки.....	43
14.2. Идеальный цикл парокомперссорной холодильной установки.....	43
Вопросы для самоконтроля.....	44
Список литературы.....	44
Лекция 15. Циклы теплонасосных установок.....	45
15.1. Схема, принцип действия идеальной теплонаносной установки.....	45
15.2. Термодинамический цикл идеальной теплонаносной установки.....	46
Вопросы для самоконтроля.....	46
Список литературы.....	46
Лекция 16. Основы теории тепломассобмена.....	48
16.1. Основные понятия и определения.....	48
16.2. Способы распространения теплоты.....	49

Вопросы для самоконтроля.....	50
Список литературы.....	50
Лекция 17. Теплопроводность.....	51
17.1. Механизм теплопроводности. Закон Фурье.....	51
17.2. Расчет теплового потока теплопроводностью при стационарном режиме.....	51
Вопросы для самоконтроля.....	53
Список литературы.....	53
Лекция 18. Конвективный теплообмен.....	55
18.1. Механизм теплоотдачи. Закон Ньютона-Рихмана.....	55
18.2. Теория подобия.....	55
Вопросы для самоконтроля.....	56
Список литературы.....	56
Лекция 19. Теплообмен излучением.....	57
19.1. Механизм переноса теплоты излучением. Законы излучения.....	57
19.2. Расчет лучистого теплообмена между телами в прозрачной среде.....	58
Вопросы для самоконтроля.....	60
Список литературы.....	60
Лекция 20. Теплопередача.....	61
20.1. Теплопередача через плоские поверхности.....	61
20.2. Теплопередача через плоские поверхности (многослойная стенка).....	62
Вопросы для самоконтроля.....	63
Список литературы.....	63
Библиографический список.....	64
Содержание.....	65