



Министерство образования и науки Самарской области
Государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение
Самарской области

«САМАРСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

(ГБПОУ «СЭК»)

Л. Г. Будников Д.С. Привалов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Методические указания к самостоятельной работе студентов
и выполнению практических работ

для студентов специальности

13.02.01 Тепловые электрические станции

Самара 2017

Печатается по решению методического совета государственного бюджетного профессионального образовательного учреждения Самарской области «Самарский энергетический колледж»

Методические указания к самостоятельной работе студентов и выполнению практических работ по дисциплине *Теоретические основы теплотехники* /сост. Будников Л.Г., Привалов Д.С. – Самара: ГБПОУ «СЭК», 2017 – 28 с.

Издание содержит методические указания к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине *Теоретические основы теплотехники*.

Замечания, предложения и пожелания направлять в ГБПОУ «СЭК» по адресу: 443001, г. Самара, ул. Самарская 205-А или по электронной почте info@sam-ek.ru

ГБПОУ «СЭК» 2017 г

Общие указания

Практические работы являются одним из основных видов учебных занятий, т.к. выполнение практических работ закрепляет и углубляет теоретические знания, позволяет приобрести практические навыки в решении многих технических вопросов, а также пользоваться справочной литературой и нормами технической документации. Кроме того, выполнение практических работ является подготовкой к курсовому и дипломному проектированию.

Цель практических занятий – закрепление теоретических знаний, полученных в результате изучения дисциплины *Теоретические основы теплотехники*.

Отчёты по практическим занятиям оформляются в виде рабочей папки. Все чертежи (диаграммы) выполняются в технике компьютерной графики. Вывод по практической работе делается в устной и письменной форме.

Методические рекомендации к самостоятельной работе по подготовке к практическим занятиям

Прежде всего, следует проработать текст лекции по соответствующей теме. Затем внимательно изучить цель практического занятия, содержание основных учебных вопросов, выполнить задания, которые могут быть даны преподавателем.

Спланировать самостоятельную работу по подготовке к занятию:

- когда, какие источники, по какой проблеме следует найти и изучить;
- когда и по каким вопросам подготовить краткие письменные ответы.

Подобрать в библиотеке литературу, которая рекомендована для подготовки к занятию, просмотреть её, отобрать источники, где имеются ответы на поставленные учебные вопросы.

Внимательно прочитать отмеченный учебный материал, выделить главные мысли, проблемы, требующие дополнительного обоснования, практического решения и т.д.

Критерии оценивания практической работы

Оценка «5» (отлично) ставится, если студент выполняет работу в полном объёме с соблюдением необходимой последовательности проведения опытов и измерений; самостоятельно и рационально монтирует необходимое оборудование; все опыты проводит в условиях и режимах, обеспечивающих получение правильных результатов и выводов; соблюдает требования правил безопасного труда; в отчёте правильно и аккуратно выполняет все записи, таблицы, рисунки, чертежи, графики, вычисления; правильно выполняет анализ погрешностей.

Оценка «4» (хорошо) ставится, если выполнены требования к оценке 5, но было допущено два-три недочёта, не более одной негрубой ошибки и одного недочёта.

Оценка «3» (удовлетворительно) ставится, если работа выполнена не полностью, но объём выполненной части таков, что позволяет получить правильные результаты и выводы; если в ходе проведения опыта и измерений были допущены ошибки.

Оценка «2» (неудовлетворительно) ставится, если работа выполнена не полностью и объём выполненной части работы не позволяет сделать правильные выводы; если опыты, измерения, вычисления, наблюдения производились неправильно.

Практическое занятие 1

Основные положения технической термодинамики.

Газовые законы. Газовые смеси

Цель: определить параметры состояния рабочих тел; выполнить пересчёт параметров из одной системы измерения в другую; рассчитывать характеристики газовых смесей; выполнить анализ полученных результатов. Выполнить контрольное задание. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Рабочее тело – тело, посредством которого производится взаимное превращение теплоты и работы. В термодинамике различают идеальный и реальный газы.

Идеальный газ – это газ, молекулы которого представляют собой материальные точки, несвязанные между собой каким-либо взаимодействием и находящимся в хаотичном движении.

Термодинамическим состоянием тела или системы тел называется совокупность физических свойств, присущих данной системе или телу.

Для характеристики конкретных условий, в которых находится данная система, или процесса, идущего в системе, необходи

о знать такие параметры состояния, как удельный объём, абсолютное давление, абсолютная температура.

Удельный объём (v , м³/кг) - это объём единицы массы вещества

$$v = \frac{V}{m},$$

где V – объём произвольного количества вещества, м³;

m – масса этого вещества, кг.

Давление – величина, определяемая отношением силы (нормальной составляющей силы), действующей на поверхность, к площади этой поверхности (p , Па=Н/м²)

Для измерения давления применяют манометры: атмосферного давления – барометры, разрежения – вакуумметры.

Абсолютное давление ($p_{абс}$), если оно больше атмосферного (барометрического) ($p_б$), определяется как сумма

$$p_{абс} = p_б + p_м$$

$p_м$ – показания манометра, измеряющего избыточное давление.

Если $p_{абс} < p_б$, то

$$p_{абс} = p_б - p_в'$$

где $p_в'$ – показания вакуумметра, измеряющего разрежение.

Нормальные физические условия (н. ф. у.) соответствуют $T_0 = 273,15$ К, $p_0 = 101332$ Па

Уравнение состояния устанавливает связь между давлением, температурой и удельным объёмом среды постоянного состава.

Уравнение состояния для идеального газа (уравнение Клапейрона)

а) для 1 кг газа $pV = RT,$

где R - удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К).

б) m кг газа $pV = mRT,$

в) для моля идеального газа уравнение состояния $pV_{\mu} = \mu RT,$

где V_{μ} – объём, занимаемый одним молем газа, μ - молекулярная масса. При н.ф.у. $V_{\mu}=22,4146 \text{ м}^3/\text{кмоль}$.

Универсальная газовая постоянная (одинаковая для любого газа)

$$\mu R = \frac{p_0 V_{\mu}}{T_0} = 8314,3 \text{ Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К}),$$

Газовая постоянная

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314,3}{\mu} \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

Температура (Т, К) – величина, характеризующая степень нагретости тел.
Абсолютная температура тела

$$T \text{ К} = 273,15 + t \text{ }^{\circ}\text{С}.$$

Контрольное задание 1

Задача 1.1. Определить абсолютное давление газа в резервуаре ($p_{\text{абс}}$, Па), если ртутный манометр показывает избыточное давление ($p_{\text{м}}$) _____ мм рт. ст., а барометр ($p_{\text{б}}$) _____ мм рт. ст. (1 балл)

Таблица 1 – Соотношения между единицами измерения давления.htm

Задача 1.2. Определить абсолютное давление газа в резервуаре ($p_{\text{абс}}$, Па), если вакуумметр показывает разрежение ($p_{\text{в}}$) _____ мм рт. ст), а барометрическое давление ($p_{\text{б}}$) _____ мм рт. ст. (1 балл)

Задача 1.3. Определить плотность газа _____ при нормальных физических условиях. (2 балла)

Таблица 2 – Значения μ и R для газов.htm

Задача 1.4. Бак ёмкостью $V = 10 \text{ м}^3$ заполнен 25 кг газа _____. Определить абсолютное давление в баке, если температура в нем $t = 27 \text{ }^{\circ}\text{С}$. (2 балла).

Примечание: (газы те же, что и в задаче 1.3).

№ задачи	Наименование величин	Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1.1	$p_{\text{м}}$	300	305	310	315	320	200	220	250	240	350
	$p_{\text{б}}$	750	760	740	750	760	740	750	760	740	750
1.2	$p_{\text{в}}$	300	305	310	315	320	200	220	250	240	350

	p_6	750	760	740	750	760	740	750	760	740	750
1.3	Газ	N_2	NH_3	Ar	H_2	H_2O	He	O_2	CH_4	CO	CO_2

Практическое занятие 2

Теплоёмкость

Цель: определить теплоёмкость по формулам, таблицам и опытным путем; рассчитать характеристики газовых смесей; выполнить анализ полученных результатов. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Газовой смесью называется смесь отдельных газов, химически не реагирующих между собой, т.е. каждый газ в смеси полностью сохраняет все свои свойства и занимает весь объём смеси.

Давление, которое создают молекулы каждого отдельного газа смеси, при условии, что этот газ находится один в том же количестве в том же объёме и при той же температуре, что и в смеси, называется парциальным (частичным) давлением.

Закон Дальтона: общее давление смеси идеальных газов равно сумме парциальных давлений газов, входящих в смесь

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i,$$

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

Массовая доля - отношение массы каждого отдельного газа к суммарной массе смеси

$$g_1 = \frac{m_1}{m}; g_2 = \frac{m_2}{m}; g_n = \frac{m_n}{m},$$

где g_1, g_2, \dots, g_n – массовые доли отдельных газов;
 m – суммарная масса всей смеси.

Сумма массовых долей равна единице

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

Объёмная доля – отношение парциального (приведенного) объёма каждого газа к общему объёму смеси

$$r_1 = \frac{V_1}{V}; r_2 = \frac{V_2}{V}; r_n = \frac{V_n}{V},$$

где r_1, r_2, \dots, r_n – объёмные доли;

V_1, V_2, \dots, V_n - парциальные объёмы каждого газа;

V - объём смеси газов.

Парциальный объём – это объём, который занимал бы газ, если бы его давление и температура равнялись параметрам смеси газов.

Если сложить объёмные доли, то получим

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

Задание смеси молярными долями заключается в следующем. Сначала находим количество молей каждого компонента смеси по соотношениям

$$M_1 = \frac{m_1}{\mu_1}; M_2 = \frac{m_2}{\mu_2}; \dots; M_n = \frac{m_n}{\mu_n},$$

где M_1, M_2, \dots, M_n - количество молей каждого компонента;

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ - молекулярные веса соответствующих компонентов смеси.

Отсюда вся газовая смесь будет содержать M молей

$$M = \sum_{i=1}^n M_i.$$

Мольные доли

$$y_1 = \frac{M_1}{M}; y_2 = \frac{M_2}{M}; \dots; y_n = \frac{M_n}{M}.$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1.$$

Мольные и объёмные доли численно равны между собой.

$$y_i = r_i.$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси μ будет определяться по формуле

$$\mu = \frac{m}{M} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{\sum_{i=1}^n M_i}.$$

Знание кажущейся молекулярной массы смеси позволяет по формуле $R=8314,3/\mu$ находить газовую постоянную смеси R .

Соотношение между массовыми и объёмными долями

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

Контрольное задание 2

Задача 2.1. Смесь по массе состоит из ____% H_2 и ____% O_2 . Определить объёмный состав смеси.

Задача 2.2. Определить парциальные давления кислорода и азота в воздухе при нормальных физических условиях, если массовый состав воздуха $g_{O_2} =$ ____%, $g_{N_2} =$ ____%.

№ зада-чи	Наименование величин	Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
2.1	H ₂	11	10	20	25	30	35	5	12	15	22
	O ₂	89	90	80	75	70	65	95	88	85	78
2.2	g _{O₂}	23,3	21,2	20,2	24,8	25,6	28,9	37,3	24,3	22,2	21,7
	g _{N₂}	76,7	78,8	79,8	75,2	74,4	71,1	62,7	75,7	77,8	78,3

Практическое занятие 3

Заноны термодинамики. Термодинамические процессы. Энтальпия. Энтропия.

Цель: провести анализ изменения состояния идеального газа для любого термодинамического процесса; изобразить процессы изменения состояния идеального газа о PV и TS-диаграммах. Выполнить контрольное задание. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Большое значение для теоретических исследований и для прикладных работ имеют следующие процессы:

изохорный, протекающий при постоянном объёме ($v = \text{const}$), *изобарный* – при постоянном давлении ($p = \text{const}$), *изотермический* – при постоянной температуре ($T = \text{const}$), *адиабатный* – без теплообмена с окружающей средой ($dq = 0$). Кроме того, существуют еще *политропные процессы*, которые при определенных условиях могут переходить во все вышеперечисленные процессы.

Таблица 3 – Основные расчетные соотношения для термодинамических процессов.htm

$$\text{Теплота нагревания газа } Q_p = mc_p(T_2 - T_1); Q_v = mc_v(T_2 - T_1)$$

Изменение внутренней энергии в термодинамических процессах с идеальным газом

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

Энтальпия

$$i = u + pv$$

Изменение энтальпии в любом термодинамическом процессе с идеальным газом

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

Контрольное задание 3

Задача 3.1. В резервуаре ёмкостью 1 м³ находится воздух при давлении $p_1 = 0,5$ МПа и температуре $t_1 = 20$ °С. Как изменится температура и давление воздуха, если к нему подвести $Q = \underline{\hspace{2cm}}$ кДж теплоты?

Задача 3.2. Теплота, подводимая к газу при постоянном давлении, затрачивается на изменение его внутренней энергии и совершение работы. Определить

количество подводимой теплоты и изменение температуры воздуха, если работа расширения при изобарном нагревании 1 кг воздуха составляет 20,5 кДж теплоты.

Примечание: для воздуха $c_p=1,005$ кДж/кг·К

Задача 3.3. Адиабатно расширяется 1 кг воздуха с температурой $t_1 = 20$ °С и давлением $p_1=0,8$ МПа до давления $p_2=$ _____ МПа. Определить параметры состояния в конце процесса расширения, работу процесса и изменение внутренней энергии газа.

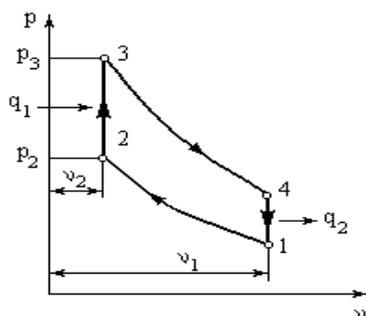
№ задачи	Наименование величин	Вариант									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
3.1	Q	275	300	225	150	315	280	260	230	200	180
3.2	l	20,5	18,3	18,0	15,0	22,2	25	21	22	18	23
3.3	p_2	0,2	0,1	0,15	0,13	0,12	0,17	0,18	0,16	0,14	0,19

Практическое занятие 4

Газовые циклы

Цель работы: изучить термодинамические основы работы компрессоров; изучить принцип работы одно- и многоступенчатого компрессора при изотермическом, адиабатном и политропном сжатии; индикаторные диаграммы работы компрессора. Выполнить контрольное задание. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания



Идеальный газ с начальными параметрами p_1, v_1, T_1 сжимается по адиабате 1-2. В изохорном процессе 2-3 рабочему телу от внешнего источника теплоты передается количество теплоты q_1 . В адиабатном процессе 3-4 рабочее тело расширяется до первоначального объема $v_4=v_1$. В изохорном процессе 4-1 рабочее тело возвращается в исходное состояние с отводом от него теплоты q_2 в теплоприемник.

Характеристиками цикла являются: $\varepsilon = v_1 / v_2$ – степень сжатия;

$\lambda = p_3 / p_2$ - степень повышения давления.

Количество подведенной и отведенной теплот определяются по формулам

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) \quad ;$$

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1). \quad \text{кДж/кг}$$

Для термического КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} \text{ или } \eta_{tv} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Термический КПД цикла Карно (эталон) $\eta_t = 1 - \frac{T}{T_3} = \frac{1}{3}$.

Параметры рабочего тела во всех характерных точках цикла:

Точка 1	$v_1 = \frac{RT_1}{p}$
Точка 2	$v_2 = v_1 / \varepsilon ;$ $p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = p_1 \varepsilon^k ;$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} ; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$
Точка 3	$v_3 = v_2 ;$ $p_3 = p_2 \quad \lambda = p_1 \varepsilon^k \lambda ;$ $\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda ; T_3 = T_2 \lambda = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda.$
Точка 4	$v_4 = v_1 ;$ $p_4 = p_3 \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^k = p_3 \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^k = \frac{p_3}{\varepsilon^k} = p_1 \lambda ;$ $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4} \right)^{k-1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{k-1} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$ $T_4 = T_1 \varepsilon^{k-1} \lambda \left(\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right) = T_1 \lambda .$

Полезная работа l' , которую производит 1 кг рабочего тела за один цикл равна разности работ расширения и сжатия

$$l' = l_{расш} - l_{сж} = \left[\frac{1}{k-1} (p_3 v_3 - p_4 v_4) - (p_2 v_2 - p_1 v_1) \frac{1}{k-1} \right]$$

Контрольное задание 4

Задача 4.1. Для идеального цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при постоянном объёме определить параметры во всех основных точках, полезную работу, количество подведённой и отведённой теплоты, термический КПД цикла Карно по условиям задачи, если даны $p_1 = 1$ бар, $T = 320$ К, степень сжатия $\varepsilon = 4,0$, степень повышения давления $\lambda = 4,0$. Рабочее тело – воздух, показатель адиабаты $k = 1,4$. Теплоёмкость рабочего тела принять постоянной

($c_v=0,724$ кДж/кг·К).

Практическое занятие 5

Реальные газы. Водяной пар и его свойства

Цель: провести сравнение термических КПД циклов ДВС с различными способами подвода теплоты; построить индикаторные диаграммы циклов; провести сравнение термических КПД циклов ГТУ с различными способами подвода теплоты; изобразить циклы PV и TS-диаграммах; определить величину теоретической работы и мощности двигателя компрессора в цикле при различных видах сжатия. Выполнить контрольное задание. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Реальные газы отличаются от идеальных тем, что молекулы этих газов имеют объёмы и связаны силами взаимодействия, убывающими с ростом расстояния между молекулами. При практических расчётах параметров реальных газов наряду с уравнением состояния применяется отношение

$$\frac{p \cdot v}{R \cdot T} = c, \text{ называемое коэффициентом сжимаемости.}$$

Для идеальных газов при любых условиях $p \cdot v = R \cdot T$ (уравнение состояния), поэтому для них $c = 1$. Следовательно, коэффициент c выражает отклонение свойств реальных газов от свойств идеальных. Для реальных газов в зависимости от давления и температуры может быть $c < 1$ или $c > 1$. При *малых давлениях и высоких температурах* $c \approx 1$. В этих случаях реальные газы можно рассматривать как идеальные.

Чтобы учесть различие свойств реальных и идеальных газов, нужно иметь уравнения состояния, связывающие величины p , v , T . Поведение реального газа можно описать с высокой точностью с помощью *вириального уравнения* (уравнения с вириальными коэффициентами):

$$p \cdot V = R \cdot T \cdot \left(1 + \frac{B_2}{V} + \frac{B_3}{V^2} + \dots \right)$$

где B_v - вириальные коэффициенты, которые выражаются через потенциальную энергию взаимодействия молекул газа и температуру T .

Уравнение в общем виде не может быть использовано для непосредственных расчётов реальных газов. Для отдельных частных случаев получены различные расчётные уравнения. Из-за сложности вычисления вириальных коэффициентов обычно ограничиваются расчётом первых двух коэффициентов. Тогда расчётное уравнение имеет вид:

$$p \cdot v = R \cdot \left(1 - \frac{A}{v} - \frac{B}{v^2} \right)$$

где A и B – вириальные коэффициенты, являющиеся функциями только температуры.

Наиболее простое уравнение, качественно верно отображающее поведение реального газа, – уравнение Ван-дер-Ваальса:

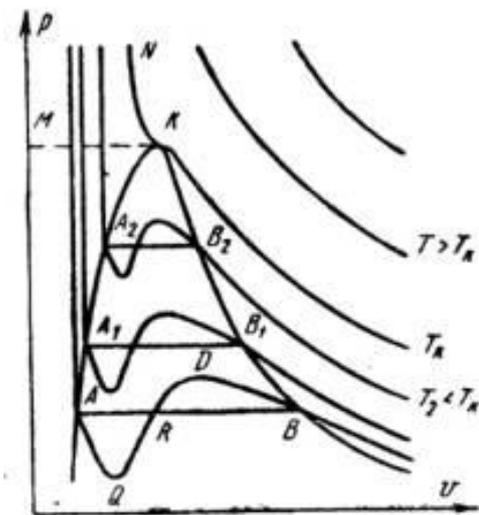
$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = R \cdot T$$

В уравнении a и b – постоянные величины. Первая учитывает силы взаимодействия, вторая – размер молекул. Отношение a/v^2 характеризует добавочное давление, под которым находится реальный газ вследствие сил сцепления между молекулами, называемое *внутренним давлением*.

Для жидких тел это давление весьма велико (для воды при 20°C оно составляет 1050 МПа), а для газов из-за малых сил сцепления молекул – очень мало. Поэтому внешнее давление, действующее на жидкость, оказывает ничтожное влияние на её объём, и жидкость считают несжимаемой. В газах, ввиду малости значения a/v^2 , внешнее давление легко изменяет их объём.

Уравнение Ван-дер-Ваальса качественно верно отображает поведение жидкостей и газов, но для двухфазных состояний оно неприменимо.

На p - v -диаграмме показаны изотермы, построенные по уравнению Ван-дер-Ваальса. Видно, что при сравнительно низких температурах на кривых имеются волнообразные участки. Чем выше температура, тем короче участки. Этим участкам соответствует непрерывный переход от жидкого состояния к парообразному при данной температуре. Точки A_i отвечают жидкому состоянию, точки B_i – парообразному состоянию вещества.



В действительности переход из жидкого состояния в парообразное всегда происходит через двухфазное состояние вещества (влажный пар). При данной температуре переход происходит при постоянном давлении. Этот действительный переход из жидкого состояния в парообразное изображается прямыми линиями $A_i B_i$.

Для особо чистых веществ возможно осуществление участков волнообразной кривой AQ и DB . В первом случае имеют место неустойчивые состояния *перегретой* жидкости, а во втором – *переохлажденного* пара.

При определенной температуре изотерма уравнения Ван-дер-Ваальса не будет иметь волнообразного участка (точка K). Точке K соответствует *критическая температура*. Соединив точки A_1, A_2, A_3, \dots и B_1, B_2, B_3, \dots , получим кривую, похожую на параболу. Кривая AK называется *нижней пограничной кривой* и соответствует состоянию кипения жидкости. Кривая KB называется *верхней пограничной кривой* и соответствует состоянию сухого насыщенного пара.

Таким образом, для реального вещества p - v -диаграмму можно разбить на 3 области:

1 – область жидкого состояния расположена левее нижней пограничной кривой;

2 – область двухфазных состояний (влажный пар) расположена между нижней и верхней пограничной кривой;

3 - область перегретого пара расположена правее верхней пограничной кривой и выше критической точки.

Условно область жидкости ограничивают сверху линией *КМ*- критической изобарой.

Критическую температуру Д. И. Менделеев называл *абсолютной температурой кипения*, при которой поверхностное натяжение в жидкости становится равным нулю, т.е. исчезает различие между жидкостью и парообразным состоянием вещества (насыщенным паром).

Практическое занятие 6

Термодинамические процессы водяного пара

Цель: изучить процессы изменения состояния водяного пара в *PV*, *Ts* и *hs*-диаграммах; произвести расчёт процессов изменения состояния с помощью таблиц и *hs*-диаграммы. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

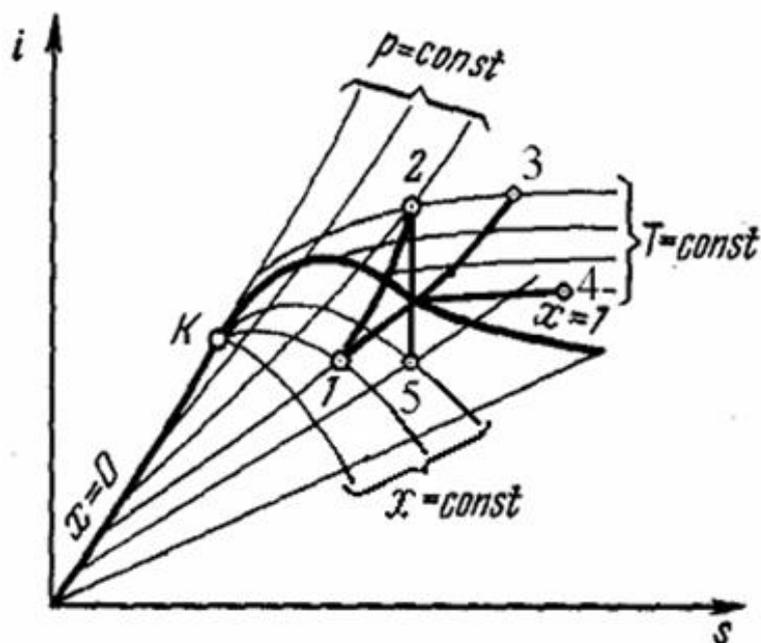


Рис.1 Термодинамические процессы водяного пара на *i, s*-диаграмме:

- 1 – 2 – изохорный процесс,
- 1 – 3 - изобарный процесс,
- 1 – 4 - изотермный процесс,
- 2 – 5 – адиабатный процесс

Для анализа работы паросиловых установок существенное значение имеют изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы. Политропные процессы не рассматриваются, т.к. водяной пар не соответствует свойствам идеального газа.

Термодинамические процессы водяного пара очень наглядно изображаются на *i, s*-диаграмме (рис 1). Процесс = горизонтальная прямая. Для удобства нанесены линии равных давлений, температур и степеней сухости. На рис. показано протекание изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного процессов на *i, s*-диаграмме. Следует обратить внимание, что в области влажного пара линии изобар и изотерм совпадают.

По i, s -диаграмме можно выполнить приближённые расчёты этих процессов, поскольку значения подлежащих определению параметров считываются непосредственно с диаграммы.

Общий метод расчёта по i, s -диаграмме состоит в следующем. По известным параметрам наносится начальное состояние рабочего тела, затем проводится линия процесса, и определяются его параметры в конечном состоянии. Далее вычисляется изменение внутренней энергии, определяются количества теплоты и работы в заданном процессе.

Для расчёта процессов изменения состояния водяного пара не используются имеющиеся для него уравнения состояния, ввиду их сложности и ограниченной применимости в зависимости от области параметров состояния водяного пара (в различных областях используются различные уравнения). Применение таких уравнений оправдано, когда они заложены в современные ЭВМ, и машина сама считает параметры по любой известной паре параметров по специальной программе.

Практически расчёт процессов изменения состояния воды и водяного пара осуществляется с использованием таблиц их термодинамических свойств и диаграмм. Из диаграмм наибольшее применение нашли h, s - диаграммы.

Наиболее простым и наглядным является метод расчета паровых процессов с использованием h, s - диаграммы. Здесь не нужно выяснять, в какой области протекает процесс, есть ли переход из зоны перегретого пара в зону влажного пара или наоборот. Всё это видно по графику процесса. Расчёт сводится к чтению диаграммы и, в случае надобности, к подсчёту по полученным из диаграммы данным работы, теплоты и изменений параметров и функций состояния. В случае, когда процесс выходит за пределы рабочей h, s - диаграммы, расчёт проводится с использованием таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара.

Диаграммы P, v и T, s служат для иллюстрации особенностей процессов и могут быть применены для графического изображения в виде площадей энергетических величин q, l, Du , характеризующих данный процесс.

В практике теплоэнергетики наиболее часто встречаются: *изохорный процесс* (растопка котла при повышении давления), *изобарный процесс* (установившийся режим работы котла, процессы в подогревателях и конденсаторах пара), *адиабатный процесс* (в паровой турбине и насосе), *изотермический процесс* (испарение воды в реакторе кипящего типа).

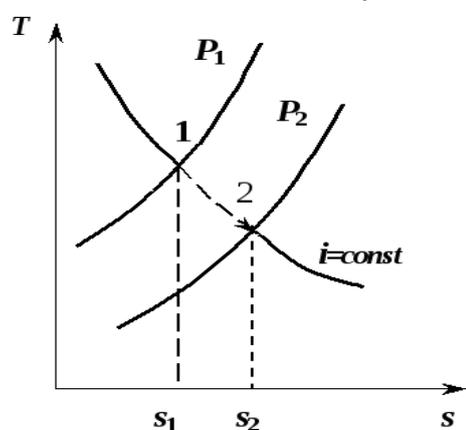
Практическое занятие 7

Истечение и дросселирование газов и паров.

Цель: рассмотреть процессы изменения состояния водяного пара в PV и Ts -диаграммах; определить параметры и характеристики водяного пара при истечении и дросселировании по hs -диаграмме; произвести расчёт скорости истечения, расчёт суживающегося сопла и сопла лавая. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Экспериментально установлено, что если на пути движения газа, пара или жидкости встречается резкое сужение поперечного сечения, то после прохождения ими этого сечения их давление уменьшается. Процесс понижения давления рабочего вещества при переходе через сужение в канале называется *дросселированием*. Этот процесс характеризуется тем, что падение давления происходит необратимо без подвода или отвода теплоты и без совершения полезной работы. Работа расширения полностью расходуется на преодоление сил трения. Вентили, задвижки, шайбы, краны, клапаны часто уменьшают проходные сечения трубопровода, а, следовательно, вызывают дросселирование газа. При дросселировании рабочего вещества происходят следующие изменения его состояния. В месте установки диафрагмы происходит увеличение скорости и уменьшается давление. Дальше происходит обратное явление – скорость вещества уменьшается, а его давление увеличивается, но до начального значения оно не поднимается. При этом часть кинетической энергии вследствие завихрений и ударов, образующихся за сужением, превращается в теплоту, которая воспринимается газом. Величина уменьшения давления $\Delta P = P_1 - P_2$ при дросселировании зависит от природы рабочего вещества, его состояния, скорости движения и степени сужения трубопровода.



Необходимо отметить, что поскольку равенство $i_2 = i_1$ получено на основании первого закона термодинамики, то оно справедливо как для реальных газов и паров, так и для капельных жидкостей. Процесс дросселирования необратим, поэтому он не может быть изображен каким-либо графиком. На T -диаграмме (рис.) процесс дросселирования условно изображен пунктирной линией, которая совпадает в начальной и конечной точках с изоэнтальпой. На s -диаграмме процесс дросселирования изображается также условно пунктирной прямой, параллельной оси абсцисс.

Практическое занятие 8

Циклы паротурбинных установок

Цель: изобразить циклы паротурбинных установок в PV и Ts -диаграммах; произвести расчёт технико-экономических показателей паросиловых циклов с помощью hs -диаграммы. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Современная стационарная теплоэнергетика базируется в основном на паровых теплосиловых установках. Продукты сгорания топлива в этих установках являются лишь промежуточным теплоносителем (в отличие от ДВС и ГТУ), а рабочим телом служит чаще всего водяной пар.

Цикл Карно насыщенного пара можно было бы осуществить следующим образом. Теплота от горячего источника подводится при постоянной температуре T_1 по линии 5-1, в результате чего вода с параметрами точки 5 превращается в сухой насыщенный пар с параметрами точки 1. Пар адиабатно расширяется в турбине до температуры T_2 , совершая техническую работу и превращаясь во влажный пар с параметрами точки 2. Этот пар поступает в конденсатор, где отдаёт теплоту холодному источнику (циркулирующей по трубкам охлаждающей воде), в результате чего его степень сухости уменьшается от x_1 до x_2 . Изотермы в области влажного пара являются одновременно и изобарами, поэтому процессы 5-1 и 2-2' протекают при постоянных давлениях P_1 и P_2 . Влажный пар с параметрами точки 2' сжимается в компрессоре по линии 2'-5, превращаясь в воду с температурой кипения. На практике этот цикл не осуществляется, прежде всего, потому, что в реальном цикле вследствие потерь, связанных с неравновесностью протекающих в нём процессов, на привод компрессора затрачивалась бы большая часть мощности, вырабатываемой турбиной.

Значительно удобнее и экономичнее в реальном цикле конденсировать пар до конца по линии 2-3, а затем насосом увеличивать давление воды от p_2 до P_1 по линии 3-4. Поскольку вода несжимаема, точки 3 и 4 почти совпадают, и затрачиваемая на привод насоса мощность оказывается ничтожной по сравнению с мощностью турбины (несколько процентов), так что практически вся мощность турбины используется в качестве полезной. Такой цикл был предложен в 50-х годах прошлого века шотландским инженером и физиком Ренкиным и почти одновременно Клаузиусом.

Термический КПД цикла Ренкина меньше, чем η_t цикла Карно при тех же температурах T_1 и T_2 , поскольку средняя температура подвода теплоты уменьшается при неизменной температуре отвода. Однако реальный цикл (с учётом неравновесности сжатия пара в компрессоре в цикле Карно) оказывается экономичнее.

Теоретически термический КПД цикла Ренкина можно сделать равным КПД цикла Карно с помощью *регенерации теплоты*, если осуществить расширение пара не по адиабате 1-2, как в обычной турбине, а по политропе 7 эквидистантной линии 4-5 нагрева воды, и всю выделяющуюся при этом теплоту (площадь 1-1'-7'-7) передать в идеальном (без потерь эксергии) теплообменнике воде (площадь 3'-3-5-5').

На практике такую идеальную регенерацию осуществить не удастся, однако в несколько ином виде регенеративный подогрев воды применяется очень широко и позволяет существенно увеличить КПД реального цикла.

К сожалению, цикл насыщенного водяного пара обладает весьма низким КПД из-за невысоких температур насыщения. Например, при давлении 9,8 МПа температура насыщения составляет 311 °С. При температуре холодного источника, равной 25 °С, $\eta_{тККарн} = (273 + 25)/(273 + 311) = 0,49$. Дальнейшее увеличение температуры, а значит, и давления не имеет смысла, ибо, мало увеличивая

КПД, оно приводит к утяжелению оборудования из условий прочности, а также к уменьшению количества теплоты, забираемой каждым килограммом воды в процессе испарения 5-1 (из-за сближения точек и на рис. и по мере повышения температуры). Это значит, что для получения той же мощности необходимо увеличивать расходы воды и пара, т. е. габариты оборудования.

При температуре, превышающей критическую (для воды $t_{кр} = 374,15^{\circ}\text{C}$ что соответствует давлению 22,1 МПа), цикл на насыщенном паре вообще невозможен.

Между тем, металлы, которыми располагает современное машиностроение, позволяют перегревать пар до 550 – 600 °С. Это дает возможность уменьшить потери эксергии при передаче теплоты от продуктов сгорания к рабочему телу и тем самым существенно увеличить эффективность цикла. Кроме того, перегрев пара уменьшает потери на трение при его течении в проточной части турбины. Все без исключения тепловые электрические станции на органическом топливе работают сейчас на перегретом паре, а иногда пар на станции перегревают дважды и даже трижды. Перегрев пара всё шире применяется и на атомных электростанциях, особенно в реакторах на быстрых нейтронах.

Практическое занятие 9

Основные положения теории теплообмена

Цель: определить коэффициент теплопроводности; рассчитать количество теплоты, переданной теплопроводностью через стенки различной формы. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Процесс передачи теплоты теплопроводностью происходит при непосредственном контакте тел или частицами тел с различными температурами и представляет собой молекулярный процесс передачи теплоты. При нагревании тела кинетическая энергия его молекул возрастает и частицы более нагретой части тела, сталкиваясь с соседними молекулами, сообщают им часть своей кинетической энергии.

Конвекция – это перенос теплоты при перемещении и перемешивании всей массы неравномерно нагретых жидкости или газа. При этом, перенос теплоты зависит от скорости движения жидкости или газа прямо пропорционально. Этот вид передачи теплоты сопровождается всегда теплопроводностью.

Одновременный перенос теплоты конвекцией и теплопроводностью называется *конвективным теплообменом*. В инженерных расчётах часто определяют конвективный теплообмен между потоками жидкости или газа и поверхностью твёрдого тела. Этот процесс конвективного теплообмена называют *конвективной теплоотдачей* или просто теплоотдачей.

Процесс передачи теплоты внутренней энергии тела в виде электромагнитных волн называется излучением (радиацией). Этот процесс происходит в три стадии: превращение части внутренней энергии одного из тел в энергию

электромагнитных волн, распространение э/м волн в пространстве, поглощение энергии излучения другим телом. Совместный теплообмен излучением и теплопроводностью называют радиационно-кондуктивным теплообменом.

Совокупность всех трех видов теплообмена называется сложным теплообменом. Процессы теплообмена могут происходить в различных средах: чистых веществах и разных смесях, при изменении и без изменения агрегатного состояния рабочих сред и т.д. В зависимости от этого теплообмен протекает по-разному и описывается различными уравнениями.

Процесс переноса теплоты может сопровождаться переносом вещества (массообмен). Например, испарение воды в воздух, движение жидкостей или газов в трубопроводах и т.п. Тогда процесс теплообмена усложняется, так как теплота дополнительно переносится с массой движущегося вещества.

Практическое занятие 10

Конвективный теплообмен. Теплоотдача и теплопередача.

Основы теории подобия и моделирования.

Цель: изучить материал по темам «Основные критериальные уравнения», «Сущность теплопередачи через стенки различной формы», «Физический смысл коэффициента теплопередачи и термического сопротивления», «Факторы, влияющие на коэффициент теплопередачи». Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Конвективный теплообмен – процесс переноса тепла, происходящий в движущихся текучих средах (жидкостях либо газах) и обусловленный совместным действием двух механизмов переноса тепла: собственно конвективного переноса и теплопроводности. Таким образом, в случае К. т. распространение тепла в пространстве осуществляется за счёт переноса тепла при перемещении текучей среды из области с более высокой температурой в область с меньшей температурой, а также за счёт теплового движения микрочастиц и обмена кинетической энергией между ними. В связи с тем, что для неэлектропроводных сред интенсивность конвективного переноса очень велика по сравнению с теплопроводностью, последняя при ламинарном течении играет роль лишь для переноса тепла в направлении, поперечном течению среды. Роль теплопроводности при К. т. более значительна при движении электропроводных сред (например, жидких металлов). В этом случае теплопроводность существенно влияет и на перенос тепла в направлении движения жидкости. При турбулентном течении основную роль в процессе переноса тепла поперек потока играет пульсационное перемещение турбулентных вихрей поперек течения жидкости. Участие теплопроводности в процессах К. т. приводит к тому, что на эти процессы оказывают существенное влияние теплофизические свойства среды: коэффициент теплопроводности, теплоёмкость, плотность.

В широком понимании теплопередача и теплоотдача осуществляются

теплопроводностью, конвекцией, лучистым теплообменом, при изменении агрегатного состояния вещества, биологических процессах в живых организмах и др. Способы передачи тепла (теплоперенос или теплопередача) в твердом теле и в жидкости различны.

Перенос теплоты вследствие теплопроводности подчиняется закону Фурье. Рассматриваемая форма переноса теплоты в основном присуща твердым телам, в которых теплота распространяется передачей кинетической энергии от одних микрочастиц к другим путем соударений; перемещение самих частиц в твердом теле, естественно, исключено. Теплопроводность имеет место также в жидкостях и газах (воздухе). Но в последних теплота передаётся также путем перемещения частиц, носителей тепловой энергии. Такой способ называется конвективным теплопереносом. Заметим, что в первом случае теплота передаётся, а носители теплоты, частицы жидкости, остаются на месте, в то время как во втором случае теплота переносится вместе с жидкостью. Таким образом, в жидких и газообразных средах теплопроводность проявляется в чистом виде лишь в том случае, когда наблюдается прямая стратификация плотности. Для воды такому состоянию плотности соответствует повышение температуры с высотой при её значении более 4°C и понижение с высотой – при её температуре менее 4°C .

Свободной (естественной, плотностной) конвекцией называется движение жидкости (газа), вызываемое неоднородностью плотности частиц жидкости (газа), находящихся в поле тяготения. Поэтому свободно конвективный перенос теплоты обусловлен перемещением частиц жидкости лишь в силу изменения их плотности, что, в свою очередь, обусловлено нагреванием или охлаждением её или изменением концентрации (солёности). Например, если воду в сосуде, находящуюся при температуре выше 4°C , охлаждать сверху, то в воде возникнет свободная конвекция, т. е. активный перенос частиц воды снизу вверх. Одновременно будет происходить перенос более охлажденных частиц в обратном направлении. В этом случае наблюдается нестационарная свободная конвекция. Увеличение плотности поверхностных слоев водоёма может произойти также за счёт увеличения мутности, обусловленной притоками, или осолонения при испарении.

При изучении различных физических явлений применяют два метода исследований, которые позволяют получить количественные закономерности для рассматриваемых явлений. В первом методе используют экспериментальное изучение конкретных свойств единичного явления, во втором исходят из теоретического исследования рассматриваемой проблемы.

Достоинством экспериментального метода исследования является достоверность получаемых результатов. Кроме того, при выполнении эксперимента основное внимание можно сосредоточить на изучении величин, представляющих наибольший практический интерес.

Основной недостаток экспериментального метода заключается в том, что результаты данного эксперимента не могут быть использованы применительно к другому явлению, которое в деталях отличается от изученного. Поэтому вы-

воды, сделанные на основании анализа результатов данного экспериментально-го исследования, не допускают распространения их на другие явления.

Второй метод исследования для нахождения количественных зависимостей, который широко применяется современной наукой, рассматривается в математической или теоретической физике.

При выводе дифференциальных уравнений теоретической физики используются самые общие законы природы. Приложение этих законов к изучаемым явлениям позволяет получить наиболее общие связи между физическими параметрами, характеризующими явления.

Любое дифференциальное уравнение (или система уравнений) является математической моделью целого класса явлений. Под классом понимается такая совокупность явлений, которая характеризуется одинаковым механизмом процессов и одинаковой физической природой.

Явления, которые входят в класс, подчиняются одинаковым уравнениям, как по форме записи, так и по физическому содержанию входящих в него величин.

При интегрировании любого дифференциального уравнения можно получить бесчисленное множество различных решений, удовлетворяющих этому уравнению.

Чтобы из множества решений получить одно частное, надо знать все характерные особенности данного явления, выделяющие его из всего класса однородных явлений. Эти дополнительные условия, которые вместе с дифференциальным уравнением однозначно определяют единичное явление, называются условиями однозначности.

Практическое занятие 11

Теплоотдача при свободном движении жидкости, вынужденном продольном и поперечном обтекании труб, изменении агрегатного состояния вещества

Цель: рассчитать коэффициент теплоотдачи с помощью критериальных уравнений в различных случаях конвективного теплообмена; изучить физический смысл коэффициента теплопередачи и термического сопротивления. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Теплоотдача при свободном движении теплоносителя широко используется как в быту, так и в технике. Например, комнатный воздух нагревается печами или отопительными приборами в условиях естественной конвекции. В технике такой теплообмен происходит при нагревании воды в паровых котлах, при охлаждении паропроводов, обмуровки котлов, промышленных печей и других тепловых устройств.

Свободный теплообмен возникает в неравномерно нагретом газе или жидкости, находящихся как в ограниченном, так и в неограниченном пространстве. Если тело имеет более высокую температуру, чем окружающая среда, то слой

жидкости, нагреваясь от тела, становятся легче и под действием возникающей подъёмной силы поднимаются вверх, а на их место поступают из окружающего пространства более холодные слои. Поэтому и возникает свободное движение. Нагревание воздуха вдоль вертикальной стенки и изменение при этом коэффициента теплоотдачи. На нижней части стенки при малых температурных напорах наблюдается ламинарный характер движения; с повышением температурного напора движение принимает своеобразную «локонообразную» форму, и затем эта переходная форма сменяется вполне развитым турбулентным движением, которое сохраняется уже на всем протяжении трубы. В соответствии с изменением режима движения изменяется и коэффициент теплоотдачи α : на нижнем участке по мере увеличения толщины ламинарной пленки он уменьшается по высоте стенки, затем по мере турбулизации пограничного слоя возрастает по высоте стенки и стабилизируется на участке развитого турбулентного движения.

Своеобразный характер перемещения жидкости отмечается около горизонтальных плоских стенок или плит, обращенных нагретой поверхностью вверх. При большой площади поверхности в нагреваемой среде образуются местные восходящие и нисходящие потоки, а при малой площади поверхности устанавливается один восходящий поток. Для тех же плит, но обращенных нагретой поверхностью вниз, движение жидкости происходит лишь в тонком слое под поверхностью.

Изменение агрегатного состояния вещества происходит при кипении и конденсации. Кипение возможно во всем температурном интервале между тройной и критическими точками для данного вещества. Характерной особенностью процесса кипения является образование пузырьков пара. В процессе фазового превращения поглощается теплота парообразования. Процесс кипения всегда связан с подводом теплоты к кипящей системе. Различают кипение жидкости на твердой поверхности и кипение в объёме жидкости. Процесс кипения на твердой поверхности возникает тогда, когда температура жидкости выше температуры насыщения при данном давлении, а температура поверхности теплообмена выше температуры кипящей жидкости. Образование пузырьков пара происходит непосредственно на поверхности теплообмена. Объёмное кипение возникает при перегреве жидкости относительно температуры насыщения при данном давлении. Объёмное кипение можно получить при быстром уменьшении давления или при наличии в жидкости внутренних источников теплоты. Следует обращать внимание на особенности кипения в большом объёме, при кипении на пучках труб, при кипении внутри труб, при кипении в стекающей пленке. Наиболее простым является пузырьковое кипение в большом объёме, при котором образующийся пар свободно удаляется от поверхности нагрева. Около нагреваемой поверхности при кипении образуется тонкий пограничный слой, в котором жидкость перегрета на $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}$. Для пара температура насыщения при нормальном атмосферном давлении $t_0 = 100^\circ\text{C}$, температура всей массы жидкости равна $100,4^\circ\text{C}$, а температура пограничного слоя $109,1^\circ\text{C}$. Пузырьки пара зарождаются на обогреваемой поверхности в перегретом пограничном слое жидкости и только в отдельных точках, называемых центрами парообразо-

вания. Количество пузырьков пара будет тем больше, чем больше тепловая нагрузка поверхности нагрева, чем больше температурный напор, чем грязнее поверхность. Размер пузырьков пара зависит от смачивающей способности жидкости. При хорошей смачиваемости пузырек пара имеет тонкую ножку и легко отрывается от поверхности. При плохой смачиваемости пузырек имеет толстую ножку и трудно отрывается. Отрыв пузырьков пара вызывает интенсивную циркуляцию и перемешивание, вследствие чего резко увеличивается интенсивность теплоотдачи. Такой режим называют пузырьковым кипением. С возрастанием температурного напора количество пузырьков увеличивается и их становится так много, что они сливаются в сплошную плёнку, которая периодически разрывается, и пар прорывается в объём жидкости. Такой режим кипения называется плёночным.

Практическое занятие 12

Основные понятия и законы теплового излучения.

Теплообмен излучением между телами

Цель: рассчитать количество лучистой теплоты, степени черноты поверхности тел; рассчитать количество излучательной и поглощательной способности тел. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Тепловое излучение обуславливается возбуждением частиц вещества при соударениях в процессе теплового движения или ускоренным движением зарядов (колебания ионов кристаллической решетки, тепловое движение свободных электронов и т.д.). Оно возникает при любых температурах и присуще всем телам. Характерной чертой теплового излучения является сплошной спектр.

Интенсивность излучения и спектральный состав зависят от температуры тела, поэтому не всегда тепловое излучение воспринимается глазом как свечение. Например, тела, нагретые до высокой температуры, значительную часть энергии испускают в видимом диапазоне, а при комнатной температуре почти вся энергия испускается в инфракрасной части спектра.

Закон Кирхгофа – отношение испускательной способности тела к его поглощательной способности одинаково для всех тел и равно спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела:

$$r_{\lambda}/\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda}. \quad (26.5)$$

Закон Стефана-Больцмана – энергетическая светимость абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$Re = \sigma T^4, \quad \sigma = 5,66 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{K}^4. \quad (26.7)$$

Для серого тела формула (26.7) принимает вид

$$Re = \delta T^4,$$

где $\delta = \alpha\sigma$ – приведенный коэффициент поглощения.

Закон смещения Вина — длина волны, на которую приходится максимум испускательной способности абсолютно черного тела (λ_{\max}), обратно пропорциональна его абсолютной температуре:

$$\lambda_{\max} = b/T, \quad b = 2,89 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

При повышении температуры максимум испускательной способности смещается влево

В 1900 г. М. Планк получил формулу для расчета испускательной способности абсолютно черного тела теоретически. Для этого ему пришлось отказаться от классических представлений о непрерывности процесса излучения электромагнитных волн. По представлениям Планка, поток излучения состоит из отдельных порций - квантов, энергии которых пропорциональны частотам света:

$$E = h\nu = hc/\lambda, \quad (26.10)$$

где ν — частота; λ — длина волны; c — скорость света в вакууме; h — коэффициент пропорциональности, называемый *постоянной Планка* $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Дж с.

Каждый отдельный квант несет ничтожно малую энергию. Поэтому при больших потоках излучения его дискретная природа незаметна.

Приведем формулу Планка для испускательной способности абсолютно черного тела:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}, \quad (26.11)$$

где c — скорость света в вакууме; k — постоянная Больцмана.

Теплообмен излучением — передача теплоты, связанная с превращением внутренней энергии тела в энергию электромагнитных волн (или фотонов) и последующим превращением последней во внутреннюю энергию других тел.

В инженерных расчётах теплообмен излучением между телами, разделёнными прозрачной (диатермичной) средой, проводится в предположении о том, что излучающие поверхности — серые, их излучение — диффузное с постоянной плотностью на изотермических участках поверхности.

Серым телом называется тело, имеющее непрерывный спектр излучения, полностью подобный спектру абсолютно черного тела при той же температуре, его спектральный коэффициент теплового излучения ε_λ постоянен во всем диапазоне длин волн от нуля до бесконечности и не зависит от температуры. Диффузное излучение характеризуется интенсивностью, не зависящей от направления.

При расчётах теплового излучения серых тел применяется понятие эффективного излучения, оно представляет собой совокупность собственного E излучения тела и отраженного $E_{\text{отр}}$ излучения.

Практическое занятие 13

Теплообменные аппараты

Цель: составить уравнения теплового баланса и теплопередачи в теплообменных аппаратах; рассчитать средний температурный напор, площадь поверхности теплообменного аппарата, конечные температуры теплоносителей. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Теплообменник – устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя теплоносителями, имеющими различные температуры. По принципу действия теплообменники подразделяются на рекуператоры и регенераторы. В рекуператорах движущиеся теплоносители разделены стенкой. К этому типу относится большинство теплообменников различных конструкций. В регенеративных теплообменниках горячий и холодный теплоносители контактируют с одной и той же поверхностью поочередно. Теплообменные аппараты предназначены для проведения процессов теплообмена при необходимости нагрева или охлаждения технологической среды с целью её обработки или утилизации. В общем выпуске теплообменных аппаратов для химической и смежных отраслей промышленности в РФ около 80% занимают кожухотрубчатые теплообменники. Эти теплообменники достаточно просты в изготовлении и надежны в эксплуатации и в то же время достаточно универсальны. Теплообменники типа «труба в трубе» и змеевиковые стальные в общем объеме теплообменной аппаратуры составляют около 8%, а оросительные из чугуна – около 2%.

Кроме аппаратов, в которых передача теплоты является единственной производственной задачей (как для всевозможных нагревателей, охладителей, конденсаторов, испарителей), к теплообменникам можно отнести и разнообразные технологические установки и устройства, например, двигатели внутреннего сгорания, печи для термической обработки материалов, электрические машины, химические реакторы и пр. Общим для них является то, что для рациональной их эксплуатации необходим подвод или отвод определенного количества теплоты. В электрических машинах и аппаратах это будет охлаждение токоведущих частей с целью недопущения перегрева проводника и изоляции.

По механизму переноса теплоты теплообменные аппараты делятся на три основные группы: рекуперативные, регенеративные и смесительные.

Основным признаком рекуперативных теплообменников является наличие теплообменной поверхности – стенки, которая разделяет горячую и холодную жидкости. Это исключает перемешивания жидкостей и позволяет эксплуатировать теплообменник при различных давлениях теплоносителей. Указанные особенности столь полезны, что подавляющее число теплообменных аппаратов относится именно к рекуперативным.

Вместе с тем, разделительная стенка является частью аппарата, на котором откладывается зола, накипь, пыль и др., поэтому при эксплуатации рекуперативных теплообменников необходимо проводить мероприятия по очистке теплопередающих поверхностей.

К рекуперативным теплообменникам относятся кожухотрубчатые, пластинчатые и спиральные теплообменники.

Кожухотрубчатые теплообменники получили наибольшее распространение. Они представляют устройство (рис.), выполненное из блока труб, соединенных трубной доской и заключенных в кожух. Трубки теплообменника являются теплопередающей поверхностью и могут выполняться гладкими и ребристыми, прямыми и U-образными. Ребра у трубок могут иметь самую разнообразную форму: в виде дисков, спиралей, игл, плавников и т.п. Число ходов теплоносителей также может быть разным.

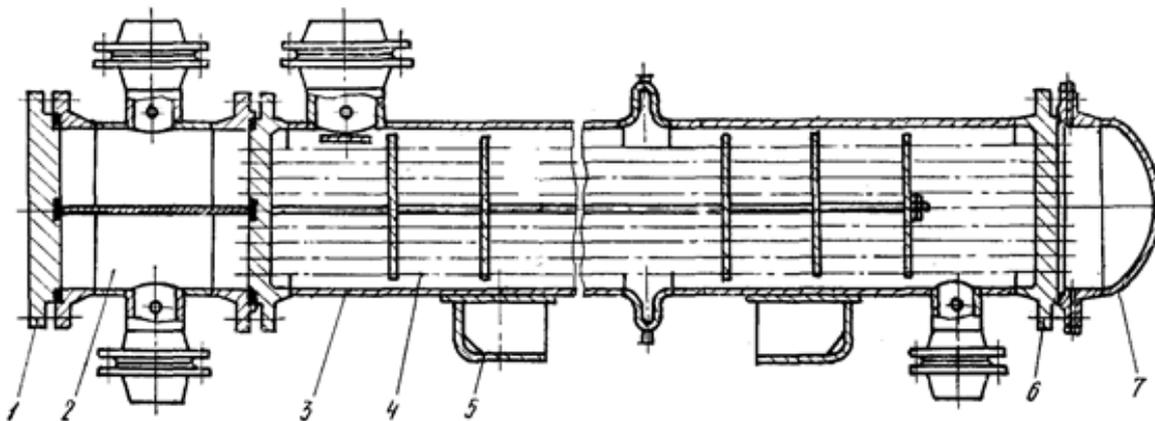


Рис. Кожухотрубчатый теплообменный аппарат:

1 – крышка камеры; 2 – распределительная камера; 3 – кожух; 4 – теплообменная труба;
5 – опора; 6 – трубная решетка; 7 – крышка

Пластинчатые теплообменники бывают самых разных конструкций и делятся в основном на разборные, полуразборные, неразборные сварные и блочные сварные. Эти аппараты состоят из группы теплообменных пластин, подвешенных на горизонтальных штангах, которые закреплены в неподвижных стойках. При помощи нажимной плиты пластины собираются в пакет и в рабочем состоянии плотно прижаты друг к другу. Пространство каналов, образующееся между пластинами, уплотняют резиновыми прокладками. Благодаря этому, в аппарате образуется две системы герметичных каналов: одна для греющей среды, другая для нагреваемой среды.

Спиральные теплообменники представляют собой две металлические ленты толщиной 3-7 мм, соединённые между собой в середине перегородкой (керном) и навитые вокруг этой перегородки так, что образуются два канала – для греющей и нагреваемой среды. Для недопущения смятия спирали под действием давлений к поверхности ленты привариваются дистанционные штифты. Спиральные теплообменники различают на аппараты с крышками, имеющие тупиковые и сквозные каналы и на аппараты без крышек с глухими каналами.

В регенеративных теплообменниках два или более теплоносителя соприкасаются с одной и той же теплообменной поверхностью. Теплообмен в этих аппаратах происходит за несколько периодов. При соприкосновении поверхности аппарата с горячим теплоносителем, его теплообменные поверхности получают теплоту и аккумулируют её внутри (нагрев поверхностей). В следующий период при соприкосновении с поверхностью

аппарата холодного теплоносителя аккумулированная теплота отдается ему (охлаждение поверхностей). Так как регенеративные теплообменники являются аппаратами периодического действия, то для непрерывности их работы используют две камеры, в которых направление теплового потока все время меняется.

Практическое занятие 14

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии

Цель: изучить по научно-технической литературе конкретные конструкции установок для нетрадиционного получения энергии. Сделать вывод по практической работе.

Методические указания

Возобновляемые – это ресурсы, энергия которых непрерывно восстанавливается природой: энергия рек, морей, океанов, солнца, ветра, земных недр и т.п.

Невозобновляемые – это ресурсы, накопленные в природе ранее, в далекие геологические эпохи, и в новых геологических условиях практически не восполняемые (органические топлива: уголь, нефть, газ). К невозобновляемым энергоресурсам относится также ядерное топливо. Энергетика на ископаемом топливе (тепловые, конденсационные электрические станции, котельные) стала традиционной. Однако оценка запасов органического топлива на планете с учётом технических возможностей их добычи, темпов расходования в связи с ростом энергопотребления показывает ограниченность запасов.

Особенно это касается нефти, газа, высококачественного угля, представляющих собой ценное химическое сырьё, которое сжигать в качестве топлива нерационально и расточительно. Отрицательное влияние на окружающую среду оказывает сжигание больших количеств топлива в традиционных энергетических установках: загрязнение, изменение газового состава атмосферы, тепловое загрязнение водоемов, повышение радиоактивности в зонах ТЭС, общее изменение теплового баланса планеты.

Практически неисчерпаемы возможности ядерной и термоядерной энергетики, но с нею связаны проблемы теплового загрязнения планеты, хранения радиоактивных отходов, вероятных аварий энергетических гигантов.

В связи с этим во всем мире отмечается повышенный интерес к использованию нетрадиционных возобновляемых источников энергии.

Установки, работающие на возобновляемых источниках, оказывают гораздо меньшее воздействие на окружающую среду, чем традиционные потоки энергии, естественно циркулирующие в окружающем пространстве. Экологическое воздействие энергоустановок на возобновляемых источниках заключается в нарушении ими естественного ландшафта. В настоящее время возобновляемые энергоресурсы используются незначительно. Их применение крайне заманчиво, многообещающе, но требует больших расходов на развитие соответствующей техники и технологий. При ориентации части энергетики на возобновляемые источники важно правильно оценить их долю, технически и эко-

номически оправданную для применения.

И в России, и в мире – это гидроэнергетика. Около 20% мировой выработки электроэнергии приходится на ГЭС. Активно развивается мировая ветроэнергетика: суммарные мощности ветрогенераторов удваиваются каждые четыре года, составляя более 150 000 МВт. Во многих странах ветроэнергетика занимает прочные позиции. Так, в Дании более 20% электроэнергии вырабатывается энергией ветра.

Доля солнечной энергетики относительно небольшая (около 0,1% мирового производства электроэнергии), но имеет положительную динамику роста. Геотермальная энергетика имеет важное местное значение. В частности, в Исландии такие электростанции вырабатывают около 25% электроэнергии. Приливная энергетика пока не получила значительного развития и представлена несколькими пилотными проектами.

Этот вид энергетики представлен в России главным образом крупными гидроэлектростанциями, обеспечивающими около 19% производства электроэнергии в стране. Другие виды ВИЭ в России пока заметны слабо, хотя в некоторых регионах, например на Камчатке и Курильских островах, они имеют существенное значение в местных энергосистемах. Суммарная мощность малых гидроэлектростанций порядка 250 МВт, геотермальных электростанций – около 80 МВт. Ветроэнергетика позиционируется несколькими пилотными проектами общей мощностью менее 13 МВт. Приливная энергетика ограничена возможностями экспериментальной Кислогубской ПЭС.

Информационное обеспечение

1. В.А. Кудинов Э.М. Карташов Техническая термодинамика: Учеб. пособие для втузов. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2007. – 261 с.
2. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. - М.: Высшая школа, 1980. - 469 с.
3. Болгарский А.В., Голдобеев В.И., Идиатуллин Н.С., Толкачева Д.Ф. Сборник задач по термодинамике и теплопередаче / Учебное пособие для ВУЗов. -М.: Высшая школа, 1972. - 304 с.
4. Ерохин В.Г., Маханько М.Г. Сборник задач по основам гидравлики и теплотехники: Учебное пособие. Изд. 3 –е, испр. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с.
5. Жуховицкий Д. Л. Сборник задач по технической термодинамике: учебное пособие – 2-е изд. – Ульяновск: УлГТУ, 2004. – 98 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	3
Практическая работа 1	4
Практическая работа 2	6
Практическая работа 3	8
Практическая работа 4	9
Практическая работа 5	11
Практическая работа 6	13
Практическая работа 7	14
Практическая работа 8	15
Практическая работа 9	17
Практическая работа 10	18
Практическая работа 11	20
Практическая работа 12	22
Практическая работа 13	24
Практическая работа 14	26
Информационное обеспечение	27