

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ им. И.РАЗЗАКОВА**

**Кафедра "Теплотехника и безопасность жизнедеятельности"**

**Методическое указание по выполнению практических занятий  
по дисциплине "Теоретические основы теплотехники" для  
студентов направления 640100  
*«Теплоэнергетика и теплотехника»*  
по кредитной технологии**

**БИШКЕК 2015**

«Рассмотрено»  
на заседании кафедры  
«Теплотехника и БЖД»  
Прот. №11 от 26.05.2015 г.

«Одобрено»  
Методическим советом  
Энергетического факультета  
Прот. № 11 от 19.05.2015 г.

Составитель: Н.А.Суюнтбекова

Методическое указание по выполнению практических занятий по дисциплине “**Теоретические основы теплотехники**” для студентов направления 640100 «*Теплоэнергетика и теплотехника*» по кредитной технологии. //КГТУ им. И. Раззакова; Сост.: Суюнтбекова Н.А./ - Б.: ИЦ «Текник», 2015. - 36 с.

Данное методическое указание предназначено для проведения практических занятий по дисциплине “**Теоретические основы теплотехники**” для студентов направления 640100 «*Теплоэнергетика и теплотехника*», с целью более глубокого изучения теоретического курса «Теоретические основы теплотехники» по кредитной технологии.

Табл. 9. Библиогр.: 16 назв.

**Рецензент: к.т.н., проф. Саньков В.И.**

## Методические указания

Данное методическое указание предназначено для выполнения практических занятий с целью более глубокого изучения теоретического курса “Теоретические основы теплотехники” студентам по кредитной технологии. Для этого каждый студент получает индивидуальное задание согласно своему варианту, включающее в себя 12 задач и 12 вопросов по основным разделам “Технической термодинамики и теплопередачи”.

Контрольное задание охватывает большинство разделов технической термодинамики и теплопередачи. Они составлены на основании задачников (9,10,11,12,13).

При выполнении полученного задания студент должен использовать теоретический материал изложенный в лекциях, учебниках, справочниках, а также он имеет возможность получить индивидуальную консультацию у преподавателя.

Выполненную работу студенту необходимо защитить. При защите решенных задач студент должен объяснить алгоритм решения, обосновать его и проанализировать полученный результат.

Таким образом, итогом выполненного самостоятельного задания является правильное решение и защита задач как в количественном отношении (ответ), так и в качественном (алгоритм), проведение грамотного анализа решения, усвоение теоретического курса при его практическом использовании. Решение задач и ответы на контрольные вопросы представляются преподавателю либо в письменной форме, либо непосредственно во время консультации.

Задачи, приведенные в пособии, разделены по разделам. В начале каждого раздела дается краткая теория и примеры решения типовых задач.

Номера задач контрольных вопросов выбираются из таблицы согласно варианту.

В пособии справочные данные по теплофизическим величинам не приводятся, так как на кафедре имеется вся необходимая справочная литература (16).

## Содержание дисциплины

### 1. Техническая термодинамика

#### *Глава 1. Параметры состояния тела. Идеальные газы и газовые смеси.*

##### **1.1. Основные понятия и определения технической термодинамики**

**Теплотехника** – общетехническая дисциплина, изучающая методы получения, превращения, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности устройств преобразования тепла и работы. Теоретическими основами теплотехники (ТОТ) является техническая термодинамика и теория тепло- и массообмена.

**Цель преподавания теплотехники** – ознакомление студентов с тепловыми процессами и их конструктивным оформлением в виде теплотехнического оборудования в целях экономии и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, а также с процессами распространения тепла в пространстве.

Термодинамическая система. Энергия. Теплота. Работа. Внутренняя энергия. Рабочее тело. Параметры состояния. Термодинамический процесс.

**Техническая термодинамика** изучает процессы взаимного превращения теплоты и работы. Для этого используются два закона термодинамики, которые носят общий характер. Первый закон термодинамики дает количественную связь между теплотой, работой и изменением внутренней энергии тела в различных конкретных термодинамических процессах. Второй закон термодинамики определяет условия преобразования теплоты в работу, указывает вероятность и направление протекания реальных процессов по изменению энтропии тела  $S$ .

**Термодинамическая система** – это физическое тело или совокупность физических тел, находящихся во взаимодействии друг с другом и окружающей средой.

**Энергия** – это мера движения материи.

В термодинамике рассматривается внутренняя энергия тела –  $U$ , которая является параметром состояния.

**Внутренняя энергия** – это сумма кинетической энергии теплового движения микрочастиц (атомы, молекулы и т.д.) и потенциальной энергии взаимодействия микрочастиц между собой, составляющих тепло.

$$U = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}}.$$

Каждое тело в определенном состоянии имеет вполне определенный запас внутренней энергии. Изменение внутренней энергии  $U$  не зависит от вида процесса изменения состояния тела и определяется разностью их значений в конечном и начальном состоянии тела:

$$\Delta U = U_2 - U_1.$$

При механическом или тепловом взаимодействии тел в каких-либо термодинамических процессах возможны две формы переноса энергии между ними: микрофизическая и макрофизическая, в результате которых внутренняя энергия этих тел изменяется.

**Макрофизическая форма** переноса энергии между телами называется работой  $L$ . Это форма переноса внутренней энергии осуществляется при механическом взаимодействии тела с окружающей средой, сопровождающаяся изменением объема или давления тела в результате которого совершается работа. Величина, совершенной работы не зависит от температуры рабочего тела.

**Микрофизическая форма** переноса энергии между телами осуществляемая при тепловом взаимодействии тел имеющих различную температуру и обусловленная тепловым движением микрочастиц, называется **теплотой**  $Q$ .

В различных процессах величины  $L$  и  $Q$  различны, поэтому они являются функциями процесса.

Преобразование теплоты  $Q$  в работу  $L$  и наоборот происходит через изменение внутренней энергии  $U$  рабочего тела. В технической термодинамике в качестве рабочего тела часто рассматривается идеальный газ или смесь идеальных газов, например, в циклах двигателей внутреннего сгорания.

**Рабочее тело** – это физическое тело, при помощи которого теплота превращается в работу и наоборот в технических устройствах.

**Состояние равновесия** тела – состояние, в котором абсолютные температура и давление тела во всех его точках одинаковы и равны соответствующим параметрам состояния окружающей среды. В этом случае механическое и тепловое взаимодействие между телом и окружающей средой отсутствует.

**Термодинамический процесс** – непрерывное изменение состояния тела вследствие механического или теплового взаимодействия его с окружающей средой.

Для расчета  $L$ ,  $Q$ ,  $\Delta U$  в различных процессах изменения состояния тела используются параметры состояния: абсолютная температура  $T$ , абсолютное давление  $P$ , удельный объем  $v$ .

Физические величины, характеризующие состояния тела, называются параметрами состояния. К основным параметрам состояния относятся: абсолютное давление, абсолютная температура и удельный объем.

1. **Абсолютное давление**  $P$ , (Па) – это полное давление, которое испытывает тело на своей поверхности. Оно определяется только расчетным путем. Для определения  $P_{абс}$  необходимо знать атмосферное давление и давление газа или жидкости внутри закрытого сосуда.

Вообще давление – это сила, действующая на единицу поверхности тела по нормали к этой поверхности.

$$P = \frac{F}{S}, \left( \frac{Н}{м^2} = Па \right).$$

а) если давление в закрытом сосуде больше атмосферного, оно называется избыточным, измеряется манометром и в этом случае абсолютное давление определяется по формуле:

$$P_{абс} = P_{изб} + P_{атм}.$$

б) если давление в закрытом сосуде меньше атмосферного, оно называется вакуумным, измеряется вакуумметром и абсолютное давление определяется по формуле:

$$P_{абс} = P_{атм} - P_{вак}$$

2. **Абсолютная температура**  $T$ , ( $^{\circ}K$ ) – это интенсивность теплового движения микрочастиц тела, характеризующая степень нагретости тела и величина, определяющая направление переноса тепла. При равенстве температур двух тел самопроизвольный перенос тепла между ними невозможен. Абсолютная температура величина положительная  $T > 0$ . Она определяется только расчетным путем по формуле:

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

где  $t$  – практическая температура тела.

Практическая температура тела измеряется различными термометрами (жидкостные и электрического сопротивления), а также термопарами и измеряется в градусах Цельсия.

3. **Удельный объем**  $v, (\text{м}^3/\text{кг})$ - это объем, занимаемый единицей массы тела.

$$v = \frac{V}{M}.$$

Обратно пропорциональная величина удельного объема – плотность также является параметром состояния.

**Плотность**  $\rho, (\text{кг}/\text{м}^3)$  – это масса вещества, находящаяся в единице объема:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}.$$

## Глава 2. Уравнение состояния

Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Уравнение состояния реальных газов. Рабочая  $P$ - $v$ -диаграмма. Термодинамические процессы. Анализ в  $P$ - $v$ -диаграмме.

Уравнение состояния однозначно связывает между собой параметры состояния тела, находящегося в состоянии равновесия с окружающей средой.

**Идеальный газ** – модель реальных газов, отвечающая трем условиям:

1. Реальный газ является идеальным, если для любого состояния равновесия его с окружающей средой строго выполняются равенства:

$$Pv = RT \quad \text{для одного кг газа} \quad (1)$$

$$PV = MRT \quad \text{для } M \text{ кг газа} \quad (2)$$

$$PV_{\mu} = R_{\mu} T \quad \text{для } \mu \text{ кг газа (киломоля)} \quad (3)$$

2. Плотность идеального газа стремится к нулю.

3. Молекулы идеального газа имеют массу, но не имеют объема (являются материальными точками) и не взаимодействуют друг с другом на расстоянии (потенциальная энергия взаимодействия равна нулю). Поэтому коэффициент сжимаемости идеального газа  $Z=1$  и внутренняя энергия идеального газа зависит только от его температуры.

Газовая постоянная  $R$ , Дж/(кг·К) конкретного газа с молекулярной массой  $\mu$ , кг/кмоль, связана с универсальной газовой постоянной  $R_{\mu}=8314$  Дж/(кмоль·°К) соотношением:

$$R = \frac{R_{\mu}}{\mu}.$$

Молекулы реального газа имеют массу, объем и взаимодействуют между собой на расстоянии. Наибольшее распространение получили вириальное уравнение состояния реальных газов и уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$Z = \frac{Pv}{RT} = 1 + B(T)\rho + C(T)\rho^2 + \dots$$

$$P + \frac{a}{v^2}(v - b) = RT,$$

где  $B(T)$ ,  $C(T)$  – вириальные коэффициенты, определяемые на основе экспериментальных данных, так же как постоянные  $a$ ,  $b$ .

Смесь идеальных газов, состав смеси. Закон Дальтона. Уравнение состояния газовой смеси.

**Газовая смесь** – это механическая смесь газов, химически не взаимодействующих между собой.

Газовую смесь можно считать новым идеальным газом, свойства которого определяются составом смеси. Состав смеси может быть задан массовыми  $m_i$ , объемными  $r_i$  и мольными  $a_i$  долями, причем объемные доли численно равны мольным долям  $r_i = a_i$ .

Газовая смесь подчиняется своему уравнению состояния вида:

$$P_{см} \cdot V_{см} = M_{см} \cdot R_{см} \cdot T_{см}.$$

Общее давление смеси определяется законом Дальтона, который формулируется - общее давление смеси равно сумме парциальных давлений компонентов смеси:

$$P_{см} = \sum P_i$$

где  $P_i$  - парциальное, то есть собственное давление  $i$ -го компонента смеси.

Газовая постоянная смеси определяется через массовые доли по формуле:

$$R_{см} = \sum m_i \cdot R_i = \frac{R_{\mu}}{\mu_{см}}.$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси определяется через объемные доли:

$$\mu_{см} = \sum r_i \cdot \mu_i.$$

**Примеры: N - предпоследняя цифра варианта  
Z - последняя цифра варианта**

**Задача 1.** В закрытом сосуде создано разрежение и по показанию вакуумметра составляет  $P_B = 0,1 + 0,05N$  бар. Барометрическое давление составляет  $P_{\square} = 690 + 3Z$  мм.рт.ст. Чему равно абсолютное давление?

**Задача 2.** Определить массу азота в баллоне емкостью  $V = 50$  л, если давление по манометру  $P_{из} = 10 + 5N$  бар. При показаниях барометра  $P_{\square} = 700 + 3N$  мм рт. ст. и температура в помещении  $t = 20 + 10Z, ^\circ\text{C}$ .

**Задача 3.** Определить газовую постоянную смеси, массовый состав, парциальные давления, массу смеси, если она находится при давлении  $P = 10N$  бар. Температура  $100 + 5N, ^\circ\text{C}$ . Объем сосуда равен  $V = 10 + 5N$  л. Объемный состав смеси в долях принять из табл. 1 по шифру, равному Z.

Таблица 1

Компоне нты	Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
CO		0.5	0.4	-	-	-	0.4	0.2	-	0.2	-
$H_2$		0.5	0.2	0.3	-	-	0.1	-	-	0.3	0.2
$N_2$		-	-	0.3	0.3	-	-	0.3	-	-	0.1
$CO_2$		-	-	0.4	0.3	0.5	-	-		0.3	0.3
$H_2O$		-	-	-	0.4	0.3	-	-	0.4	-	-
$SO_2$		-	0.4	-	-	0.2	0.5	0.5	0.6	0.2	0.4

### Глава 3. Теплоемкость газов и газовых смесей

Виды теплоемкости. Уравнение Майера. Теплоемкость газовой смеси. Метод определения количества тепла через теплоемкость тела.

**Теплоемкость** – физическое свойство тела, характеризующее его способность изменять свою температуру при подводе к нему (или отводе от него) тепла в каком-либо процессе.

$$C_n = \frac{Q_n}{T_2 - T_1}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right),$$

где  $n$  – показывает в каком термодинамическом процессе к телу подведена теплота.

Численно теплоемкость равна количеству тепла необходимого для изменения температуры тела на один градус.

В зависимости от вида термодинамического процесса затрачивается разное количество теплоты для изменения температуры тела на один градус. Только в изохорном, изобарном и политропном процессах при подводе (или отводе) тепла температура тела изменяется. Поэтому теплоемкость как физическое свойство тела может быть изохорной, изобарной и политропной:  $C_p, C_v$  и  $C_n$ :

Изохорная, изобарная и политропная теплоемкости – это теплоемкости тел в соответствующих процессах, численно равные количеству тепла необходимого для изменения температуры тела на один градус в названных процессах:

$$C_v = \frac{Q_v}{T_2 - T_1}; \quad C_p = \frac{Q_p}{T_2 - T_1}; \quad C_n = \frac{Q_n}{T_2 - T_1}.$$

В зависимости от количества тела, которое может быть выражено: массой, объемом и киломолью ( $1 \text{ кг}$ ,  $\text{м}^3$  и  $\text{кмоль}$ ), различают три вида удельных теплоемкостей: массовая, объемная, мольная, связь между которыми приведена в [4].

**Удельная массовая теплоемкость** – это теплоемкость одного килограмма тела, численно равная количеству тепла, необходимого для изменения температуры одного килограмма тела на один градус:

$$C_n = \frac{Q_n}{M \cdot dT}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right).$$

**Удельная объемная теплоемкость** – это теплоемкость одного  $\text{м}^3$  газа или жидкости, численно равная количеству тепла, необходимого для изменения температуры  $1 \text{ м}^3$  на один градус:

$$C'_n = \frac{Q_n}{V_n \cdot d}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}} \right).$$

**Удельная мольная теплоемкость** – это теплоемкость одного киломоля тела, численно равная количеству тепла, необходимого для изменения температуры одного киломоля тела на один градус:



$$C_{\mu n} = \frac{Q_n}{\text{кмоль} \cdot dT}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \right).$$

Следовательно, в изохорном, изобарном и политропном процессах теплоемкость тел может быть: массовой, объемной и мольной.

Если рассматривается элементарное количество тепла  $dQ$ , подвод (или отвод) которого изменяет температуру тела на бесконечно малую величину  $dT$ , то теплоемкость тела относится к этой температуре  $T$  и называется истинной теплоемкостью тела:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\partial Q}{\partial T}.$$

Если в каком-либо процессе к телу подводится (или отводится) теплота  $Q$ , что приводит к изменению температуры тела от  $T_1$  до  $T_2$ , то теплоемкость тела в этом интервале температур называется средней теплоемкостью:

$$C_m = \frac{Q}{T_2 - T_1}.$$

Количество тепла  $Q$ , подводимое (или отводимое) к телу в каком-либо процессе и приводящее к изменению температуры от  $T_1$  до  $T_2$ , рассчитывается с использованием теплоемкостей тела. При выборе конкретной формулы необходимо учитывать вид процесса подвода (или отвода) тепла, единицу измерения количества тела (масса, объем или кмоль).

Например, для расчета количества тепла, подводимого к  $M$  кг газа в политропном процессе, необходимо использовать политропную массовую теплоемкость, среднюю в интервале изменения температуры газа:

$$Q_n = C_{nm} \cdot M(T_2 - T_1) = C_{vm} \frac{n-k}{n-1} M(T_2 - T_1). \quad (4)$$

**Задача 4.** Для задачи предыдущей задачи определить по табличным данным теплоемкости компонентов и рассчитать теплоемкости смеси объемный, массовые, мольные, при постоянном объеме и при постоянном давлении.

**Задача 5.** По условию задач 3 и 4 определить количество подведенной теплоты в процессе  $P = \text{const}$  и  $V = \text{const}$ , если температура смеси в сосуде увеличится до  $t = 200 + 5N$ , °C.

## Глава 4. Первый закон термодинамики

Внутренняя энергия. Работа расширения. Теплота. Энтальпия. Энтропия. Физический смысл, формулировка и аналитическое выражение первого закона термодинамики. Анализ для различных термодинамических процессов.

**Внутренняя энергия**,  $U$  – это сумма кинетической и потенциальной энергии микрочастиц - параметр состояния тела:

$$U = E_{\text{кин}} + E_{\text{пот}},$$

где  $E_{\text{кин}}$  – энергия теплового движения микрочастиц;  $E_{\text{пот}}$  – энергия взаимодействия микрочастиц.

Внутренняя энергия  $U$  идеальных газов зависит только от температуры

тела. При взаимодействии различных тел с различной температурой происходит передача внутренней энергии от одного тела к другому двумя методами в виде работы и теплоты.

**Работа расширения,  $L$**  – это количество внутренней энергии, переданное при механическом взаимодействии тела с окружающей средой сопровождающейся изменением его объема. Элементарная работа, совершаемая 1 кг идеального газа при его расширении или сжатии, определяется по формуле:

$$d\ell_v = PdV, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Работа, совершаемая  $M$  кг газа в процессе 1-2, определяется:

$$L_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} PdV, \text{ Дж.}$$

Для термодинамических процессов расчетные формулы для работы  $L$ , приведены в [1-4].

**Теплота,  $Q$**  – это количество внутренней энергии, переданное при тепловом взаимодействии тел с различными температурами. Количество тепла подводимое (отводимое) к телу в каком-либо термодинамическом процессе определяется только расчетным путем. Для этого используется теплоемкость и энтропия. Подведенная теплота считается положительной -  $Q > 0$ , отведенная теплота отрицательна -  $Q < 0$ .

Изменение внутренней энергии 1 кг идеального газа  $du$  : в любом термодинамическом процессе, определяются по одной и той же формуле:

$$du = C_v \cdot dT, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right).$$

Конечное изменение внутренней энергии  $M$  кг идеального газа в любом процессе 1-2:

$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 = M \cdot C_{vm} (T_2 - T_1).$$

**Энтальпия,  $H$** , Дж - это калорический параметр состояния, характеризующий полное энергосодержание тела, рассчитываемая по формуле:

$$H = U + PV.$$

Изменение энтальпии 1 кг идеального газа в любом процессе рассчитывается:

$$dh = C_p \cdot dT, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right),$$

а изменение энтальпии  $M$  кг идеального газа в любом процессе 1-2 составит:

$$\Delta H_{1-2} = H_2 - H_1 = M \cdot C_{pm} (T_2 - T_1).$$

**Энтропия тела,  $S$**  – это калорический параметр состояния тела, бесконечно малое изменение которого  $dS$  в процессе представляет собой отношение элементарного количества тепла,  $dQ$ , подводимого (или отводимого) к телу, к абсолютной температуре этого тела  $T$ .

$$dS = \frac{dQ}{T}, \left( \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right).$$

**Первый закон термодинамики** – количественное выражение всеобщего закона сохранения и превращения энергии для процессов взаимного превращения теплоты и работы.

Теплота, подводимая к телу в каком-либо процессе, расходуется на изменение внутренней энергии тела и на совершение работы расширения в этом процессе:

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + L_{1-2};$$

$$dq = du + dl.$$

Тепло, подводимое к телу в изохорном процессе, идет полностью на изменение внутренней энергии тела:

$$dv = 0, dl = Pd v = 0, dq_v = du = C_v dT.$$

Тепло, подводимое к телу в изотермическом процессе, идет полностью на совершение работы расширения:

$$du = 0, \text{ т.к. } dT = 0, dq_T = dl_T = Pd v.$$

В адиабатном процессе работа расширения совершается за счет уменьшения внутренней энергии тела:

$$dq = 0, dl = -du, Pd v = -C_v dT.$$

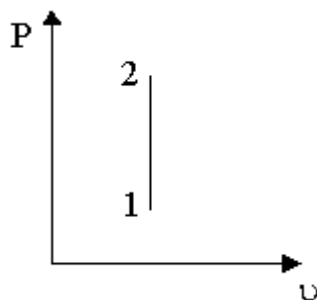
Расчетные формулы для определения  $q$ ,  $l$ ,  $\Delta u$  в различных процессах приведены в [1-4].

## Глава 5. Основные газовые процессы

Основными термодинамическими процессами являются: изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный и политропный процессы.

### *Изохорный процесс.*

Процесс проходящий при постоянном объеме называется изохорным.  $Pv$  диаграмма изохорного объема имеет вид:



Формула процесса  $V = \text{const}$ . В изохорном процессе, т.е. в процессе протекающем при постоянном объеме температура и давление изменяются прямо пропорционально друг другу:  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$ .

В изохорном процессе вся подведенная к телу теплота расходуется на изменение внутренней энергии:

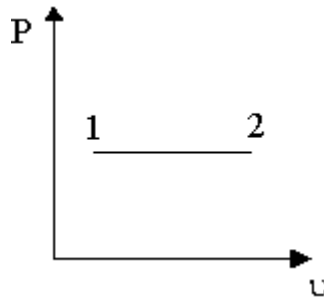
$$Q_{v_{1-2}} = \Delta U = M \cdot C_v(t_2 - t_1).$$

Работа расширения в процессе  $V = \text{const}$  равна 0:  $L_{v_{1-2}} = P(V_2 - V_1) = 0$ .

Изменение энтальпии и энтропии тела в изохорном процессе определяется по формулам:  $\Delta H = M \cdot C_p(t_2 - t_1)$ ,  $\Delta S = M \cdot C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$ .

### ***Изобарный процесс.***

Процесс протекающий при постоянном давлении называется изобарным. Формула процесса:  $P = \text{const}$ ;  $P \cup$  диаграмма процесса.



В изобарном процессе, протекающем при постоянном давлении изменяются температура и объем тела прямо пропорционально друг другу:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Количество подведенной теплоты в процессе определяется:

$$Q_p = M \cdot C_p(t_2 - t_1).$$

Работа расширения в процессе  $P = \text{const}$ :

$$L_{v_{1-2}} = M \cdot P(V_2 - V_1) \text{ или } L_v = M \cdot R(t_2 - t_1).$$

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии определяется:

$$\Delta v = M \cdot C_v(t_2 - t_1);$$

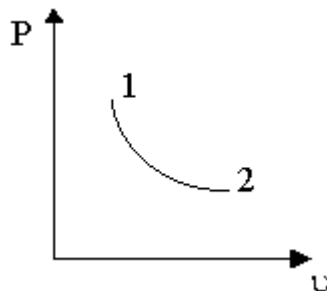
$$\Delta H = M \cdot C_p(t_2 - t_2);$$

$$\Delta S = M \cdot C_p \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

### ***Изотермический процесс:***

Процесс протекающий при постоянной температуре называется изотермическим –  $T = \text{const}$ . Уравнение процесса:  $P \cup = \text{const}$ ;

В процессе  $T = \text{const}$  изменяются давление и объем тела в обратно



пропорциональной зависимости:  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$ .

Работа расширения в изотермическом процессе определяется:

$$L_{v_{1-2}} = P_1 V_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = P_1 V_1 \ln \frac{P_1}{P_2} = MRT \ln \frac{v_2}{v_1} = MRT \ln \frac{P_1}{P_2}.$$

Так как в изотермическом процессе  $T = \text{const}$ , то изменение внутренней энергии и энтальпии в процессе равно нулю:

$$\Delta U = M \cdot C_v (t_2 - t_1) = 0; \Delta H = M \cdot C_p (t_2 - t_1) = 0.$$

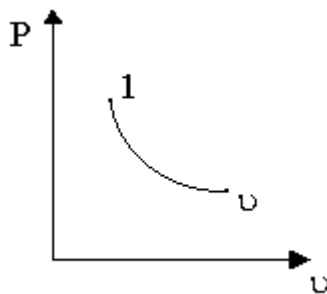
Количество теплоты подведенное к газу в процессе полностью расходуется на совершение работы расширения:  $Q_t = L_{v_{1-2}}$ .

Изменение энтропии газа в процессе определяется:

$$\Delta S = \frac{dQ}{T} = MR \ln \frac{P_1}{P_2} = MR \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

### **Адиабатный процесс:**

Процесс протекающий без теплообмена с окружающей средой называется адиабатным, который описывается уравнением:  $Pv^k = \text{const}$ , где  $k = \frac{C_p}{C_v} = \text{const}$  - показатель адиабаты.



Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса:

а) между  $P$  и  $V$ :  $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k$  и  $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{k}}$ ;

б) между  $T$  и  $V$ :  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$  и  $\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{k-1}}$ ;

в) между  $P$  и  $T$ :  $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$  и  $\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ .

Для определения работы расширения  $Mkg$  газа в адиабатном процессе используются формулы:

$$L_{V_{1-2}} = \frac{1}{k-1}(P_1V_1 - P_2V_2) = \frac{P_1V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \right] = \frac{P_1V_1}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{MR}{k-1}(T_1 - T_2).$$

Так как в адиабатном процессе нет теплообмена с окружающей средой  $Q_{1-2} = 0$ , следовательно, уравнение первого закона термодинамики имеет вид:  $0 = \Delta U + L_V$ ,

то есть изменение внутренней энергии газа и работа адиабатного процесса по величине и противоположны по знаку:  $\Delta U = -L_V$ .

Изменение внутренней энергии газа в адиабатном процессе может быть также определено уравнением:

$$\Delta U = M \cdot C_V(t_2 - t_1).$$

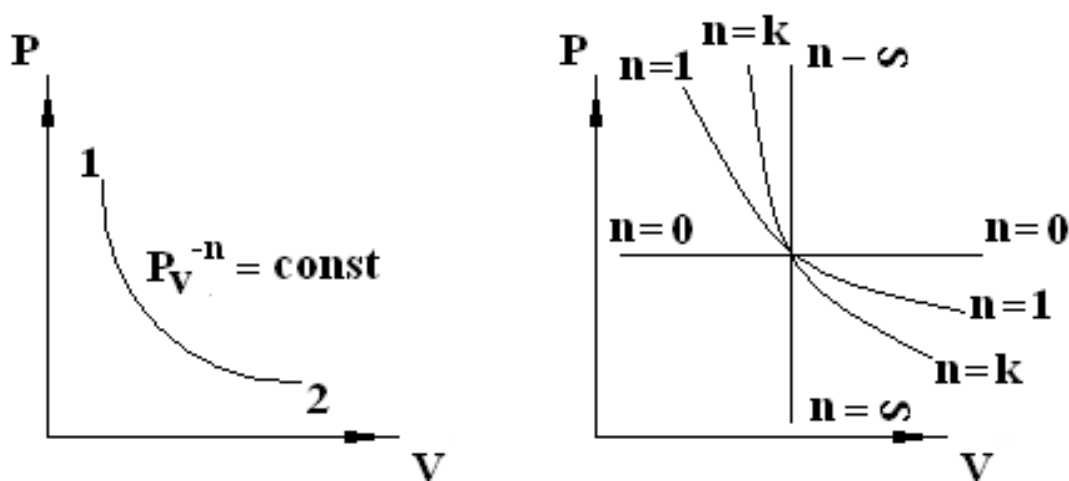
Энтропия газа в процессе остается постоянной:  $\Delta S = 0$ .

### **Полиτροпный процесс:**

Полиτροпным, реально протекающим, называется процесс, который описывается уравнением:  $PV^n = const$ ,

где  $n = \frac{C_p - C_n}{C_v - C_n}$  – показатель полиτροпы, который может принимать любое численное значение от  $-\infty$  до  $+\infty$ , но для данного процесса  $n$  является величиной постоянной.

Полиτροпный процесс имеет обобщающее значение, так как охватывает всю совокупность основных термодинамических процессов. Полиτροпный процесс в P-диаграмме можно представить:



если:  $n = \pm\infty$ , то процесс – изохорный  $V=const$ ;

$n = 0$ , то процесс – изобарный  $P=const$ ;

$n = 1$ , то процесс – изотермический  $T=const$ ;

$n = k$ , то процесс – адиабатный.

Взаимосвязь между параметрами состояния в любых двух точках на полиτροпе аналогично на адиабате и имеет вид:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}; \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Работа расширения газа в политропном процессе определяется:

$$L_{v_{1-2}} = \frac{1}{n-1}(P_1V_1 - P_2V_2) = \frac{P_1V_1}{n-1} \left[ 1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} \right] = \frac{P_1V_1}{n-1} \left[ 1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{MR}{n-1}(T_1 - T_2).$$

Если известно количество теплоты, участвующей в процессе, то работа может быть также вычислена по формуле:

$$L_{v_{1-2}} = \frac{k-1}{k-n} Q.$$

Теплоемкость политропного процесса рассчитывается по формуле:

$$C_n = C_v \frac{n-k}{n-1}.$$

Количество теплоты, подведенной к газу или отведенной от него в процессе, определяется:

$$Q_n = M \cdot C_n(t_2 - t_1) = M \cdot C_v \frac{n-k}{n-1}(t_2 - t_1).$$

Величину  $Q_n$  можно также определить, если известна работа политропного процесса, по формуле:

$$Q_n = L_{v_{1-2}} \frac{k-n}{k-1}.$$

Изменение внутренней энергии газа в политропном процессе можно определить по общей для всех процессов формуле:

$$\Delta U = M \cdot C_v(t_2 - t_1)$$

или по формулам:  $\Delta U = \frac{n-1}{n-k} Q_n = \frac{n-1}{1-k} L_{v_{1-2}}.$

Изменение энтропии в процессе определяется:

$$\Delta S = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}.$$

**Задачаб.** Газ массой  $M$  кг с начальным давлением  $P_1$  и температурой  $t_1$  изменяет свое состояние в политропном процессе с показателем политропы  $n$  до давления  $P_2$  (или температуры  $t_2$ ). Считая газ идеальным, определить недостающие начальные и конечные параметры, величину совершаемой (затраченной) работы, количество подведенной (отведенной) теплоты, а также изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Изобразить процесс в  $P$ - $V$  и  $T$ - $S$ . Численные данные для решения задачи взять из табл.2 по заданному шифру.

Таблица 2

№	Газ	Показатель политропы	Начальные параметры		Конечные параметры		Z	Количество газа M, кг
			P <sub>1</sub> , МПа	t <sub>1</sub> , °C	P <sub>2</sub> , МПа	t <sub>2</sub> , °C		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Водород, H <sub>2</sub>	1	0,1	30	1	-	1	3
2	Воздух	1,4	0,2	16	0,8	-	2	4
3	Азот N <sub>2</sub>	1,3	0,4	27	0,9	-	3	1
4	Сернистый газ SO <sub>2</sub>	0	0,5	280	-	70	4	2
5	Кислород O <sub>2</sub>	1,1	0,09	17	-	130	5	5
6	Углекислый газ CO <sub>2</sub>	1,29	3,0	43	0,5	-	6	1,6
7	Водяной пар H <sub>2</sub> O	∞	1,0	300	-	100	7	8
8	Азот N <sub>2</sub>	0,9	1,1	70	0,2	-	8	7
9	Воздух	1,2	0,6	120	-	30	9	6
0	Кислород O <sub>2</sub>	0,8	0,8	60	0,1	-	0	10

## Глава 6. Водяной пар

Водяной пар в термодинамике рассматривается как реальный газ, который получается в результате парообразования. В результате парообразования при кипении жидкости, получается **насыщенный влажный и сухой пар**.

**Насыщенным** называется пар получающийся из кипящей жидкости и имеющий одинаковую с ней температуру.

**Влажным насыщенным паром** называется механическая смесь сухого насыщенного пара и мелкодисперсных кипящих капелек жидкости.

Влажный насыщенный пар характеризуется двумя параметрами: давлением или температурой кипения насыщения и степенью сухости X.

**Степенью сухости** влажного пара называется массовая доля сухого насыщенного пара во влажном:

$$X = \frac{M_{с.н.п.}}{M_{к.ж.} + M_{с.н.п.}}$$

Степень сухости X изменяется от 0 до 1. Для кипящей жидкости X=0, а для насыщенного пара X=1.

Насыщенный пар не содержащий в своем составе мелкодисперсных кипящих капелек жидкости называется **сухим насыщенным**. Сухой насыщенный пар характеризуется либо давлением, либо температурой насыщения.

Если к сухому пару подвести теплоту при том же давлении, его температура будет увеличиваться и пар будет перегреваться. **Перегретым** называется пар, имеющий более высокую температуру чем насыщенный пар того же давления.



Перегретый пар характеризуется давлением и температурой.

### *Определение параметров воды и пара*

Термодинамические параметры кипящей воды и сухого пара определяются из таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара [17]. Величины со штрихом относятся к кипящей воде, а двумя штрихами – к сухому насыщенному пару.

Так как в изобарном процессе вся подведенная теплота расходуется на изменение энтальпии, то применив это к парообразованию получим:

$$q = r = h'' - h',$$

где  $r$  – **теплота парообразования** – это количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кипящей воды в сухой насыщенный пар.

Удельный объем  $v_x$ , энтальпия  $h_x$  и энтропия  $S_x$  влажного насыщенного пара определяется по  $h$ - $S$  диаграмме по формулам:

$$v_x = xv'' + (1-x)v' = v'' + x(v'' - v');$$

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'};$$

$$h_x = h' + x(h'' - h') = h' + xr;$$

$$S_x = S' + x(S'' - S') = S' + \frac{xr}{T_H}.$$

где  $T_H$  – температура насыщения (кипения) воды при данном давлении.

Параметры перегретого пара по его давлению и температуре определяются из таблиц теплофизических свойств воды и водяного пара [17] и  $h$ - $S$  диаграмме.

**Задача 7.** Пользуясь  $h$ - $S$  диаграммой и таблицами водяного пара определить объем, температуру, энтальпию и энтропию пара;

а) сухого насыщенного при давлении  $P_1$ ;

б) влажного при давлении  $P_2$  и степени сухости  $x$ ;

в) перегретого пара при давлении  $P_3$  и при температуре  $t_3$ .

Определить также как измеряются параметры состояния влажного насыщенного пара при:

а) нагреве в изобарном процессе до  $t_1$ ;

б) адиабатном сжатии до давления  $P_4$ ;

в) адиабатном расширении до давления  $P_5$ .

Исходные данные в табл.3.

Таблица 3

Z	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P <sub>1</sub> , бар	4	5	6	7	8	4,5	5,5	6,5	3,5	3
P <sub>2</sub> , бар	14	15	16	17	18	14	16	20	13	15
Степень сухости, х	0,95	0,85	0,7	0,87	0,94	0,69	0,66	0,75	0,8	0,9
P <sub>3</sub> , бар	2	6	10	12	14	18	20	16	21	22
t <sub>3</sub> , °С	200	250	280	300	350	400	500	600	450	600
N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t <sub>1</sub> , °С	250	300	350	200	280	320	350	400	600	450
P <sub>4</sub> , бар	40	30	35	38	50	45	40	30	35	60
P <sub>5</sub> , бар	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,15	0,2	0,25

## Теплопередача

### Глава 7. Введение в теплопередачу

Основные процессы переноса тепла (энергии) в пространстве. Основные понятия теплопередачи.

**Теплопередача** – учение о процессах переноса тепла в пространстве, в разных точках которого вещество имеет разную температуру. Неодинаковость температуры – обязательное условие переноса тепла в пространстве. При этом тепло самопроизвольно передается в сторону меньших температур.

В зависимости от состояния вещества, занимающего пространство, механизм переноса тепла сложный. Процесс теплопередачи можно условно разделить на три вида: **теплопроводность**, **конвекцию** и **тепловое излучение**. На практике же они могут происходить одновременно, поэтому студенту при рассмотрении какой-либо задачи необходимо отчетливо представлять, какой из видов теплопередачи является преобладающим по сравнению с другими.

Если рассматривается перенос тепла в неподвижном (например, твердом) теле, в разных точках которого неодинаковые температуры или между телами, имеющими разные температуры и идеальное соприкосновение между собой, то тепло передается в пространстве теплопроводностью.

**Теплопроводность** – процесс переноса тепла микрочастицами (молекулы, атомы, ионы, электроны и т.д.) при их столкновениях и соударениях вследствие обмена энергией между ними при наличии разности температур в разных точках тела.

**Конвекция** – процесс переноса тепла массой движущейся среды (поток газа или жидкости) из области высоких температур в область низких температур.

Чем больше скорость движения жидкости или газа, тем интенсивнее конвекция, так как в этом случае за единицу времени в пространстве перемещается большая масса подвижной среды. Так как отдельные макрочасти среды, имеющие разные температуры, при движении в пространстве неизбежно соприкасаются, то процессы теплопроводности и конвекции в подвижных средах взаимосвязаны.

**Конвективный теплообмен** – совместный процесс переноса тепла конвекцией и теплопроводностью в подвижных средах.

**Теплоотдача** - процесс переноса тепла между поверхностью твердого тела и подвижной средой.

**Тепловое излучение** – передача внутренней энергии одного тела другим телам при помощи электромагнитных волн.

**Теплопередача** – это процесс теплообмена между двумя подвижными средами через разделяющую их поверхность твердого тела.

В отличие от термодинамики, в теплопередаче рассматривается не только количество тепла (энергии)  $Q$ , подводимое (передаваемое) от одного тела другому, но и тепловой поток  $Q_\tau$ , и плотность теплового потока  $q$ .

**Тепловой поток** – количество тепла, переносимое в пространстве за единицу времени (секунду):

$$Q_\tau = \frac{Q}{\tau}, (\text{Вт}).$$

**Плотность теплового потока** – количество тепла переносимое в пространстве за единицу времени через единицу изотермической поверхности, то есть тепловой поток отнесенный к единице площади поверхности ( $1 \text{ м}^2$ ), в направлении нормали к ней:

$$q = \frac{Q}{\tau \cdot F} = \frac{Q_\tau}{F}, \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

**Изотермическая поверхность** – поверхность любой формы, в каждой точке которой одинаковые температуры.

## Глава 8. Теплопроводность

Основные понятия. Закон Фурье, физический смысл. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Решение конкретных задач теплопроводности при граничных условиях первого рода.

Перенос тепла в теле теплопроводностью неразрывно связан с изменением температуры тела как по пространству, так и во времени, то есть с изменением температурного поля. Неодинаковость температуры тела в разных его местах означает разные энергии хаотического движения микрочастиц тела в этих местах, поэтому чем больше разница энергий хаотического движения микрочастиц тела (температур тела) на определенном расстоянии, тем интенсивнее процесс передачи тепла в теле, тем больше  $Q$ ,  $Q_\tau$  и  $q$ .

**Градиент температуры, gradt**– возрастание температуры тела по направлению нормали к изотермической поверхности, приходящееся на единицу расстояния (1 метр) в этом же направлении.

Для трехмерного температурного поля  $t = f(x, y, z)$  :

$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial t}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial t}{\partial z} \vec{k},$$

где  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{k}$  - единичные векторы по декартовым осям координат.

**Закон Фурье.** Плотность теплового потока в теле пропорциональна градиенту температур тела:

$$\mathbf{q} = -\lambda \cdot \text{grad}t ;$$

$$Q_{\tau} = -\lambda \text{grad}t \cdot \mathbf{F} ;$$

$$Q = -\lambda \text{grad}t \cdot \mathbf{F} \cdot \tau ,$$

где  $\lambda$ - коэффициент теплопроводности, физическое свойство тела, характеризующее его способность проводить тепло через себя, Вт/(м·К).

Способность каждого тела проводить тепло через себя зависит от частоты столкновения и происходящего при этом обмена энергией, микрочастиц, составляющих это тело. Увеличение плотности тела означает увеличение числа микрочастиц в единице объема, поэтому с ростом плотности  $\lambda$ увеличивается. Рассматриваемыми микрочастицами в неподвижных газах, жидкостях, в твердых диэлектриках являются молекулы и атомы, в металлах – свободные электроны. Численные значения  $\lambda$ приводятся в таблицах теплофизических свойств [4, 5, 10, 13, 14].

Для определения количества тепла, передаваемого через тело теплопроводностью, необходимо найти в таблицах значений  $\lambda$ для данного тела, и самое главное, рассчитать градиент температуры. Для этого необходимо иметь явную зависимость  $t$ тела от координат точек тела, которая может быть получена совместным решением **дифференциального уравнения теплопроводности и условий однозначности:**

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t, \quad (5)$$

где  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  - изменение температуры тела во времени, град/с;  $a$  – коэффициент температуропроводности – мера теплоинерционных свойств тела, характеризующая скорость изменения температуры в различных точках тела, м<sup>2</sup>/с;  $\nabla^2 t$  - оператор Лапласа от температуры, град/м<sup>2</sup>.

Выражение (5) пригодно для решения любой задачи теплопроводности, но чтобы решить конкретную задачу, надо задать условия однозначности (исходные данные), которые выделяют эту задачу из множества ей подобных задач теплопроводности.

Условия однозначности включают в себя:

а) начальные условия – распределение температуры тела в начальный момент процесса нестационарной (зависящей от  $\tau$ ) теплопроводности. Для стационарных задач  $\left( \frac{\partial t}{\partial \tau} = 0 \right)$ ;

б) физические условия – задаются физические свойства тела, влияющие на процесс теплопроводности ( $\lambda$ ,  $a$ ,  $C_p$ ,  $\rho$ );

в) геометрические условия – задаются формы, размеры тела, тем самым выбирается вид температурного поля в теле;

г) граничные условия (четырёх родов) – задаются условия теплообмена на границе рассматриваемого тела и окружающей среды.

Некоторые частные решения (5) для одномерного стационарного температурного поля при граничных условиях первого и второго рода приведены в [4].

**Задача 8.** Определить температуру наружной поверхности трубы, длиной  $L$ , внутренним диаметром  $d_2$ , если тепловой поток через поверхность трубы равен  $Q_\tau$ , а температура внутренней поверхности трубы равна  $t_{c1}$ .

Рассмотреть два случая:

а) труба стальная  $\lambda_c = 50 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ ;

б) труба бетонная  $\lambda_\delta = 0,8 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

Исходные данные приведены на табл.4.

Таблица 4

Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d_1, \text{ м}$	0,13	0,44	0,15	0,36	0,17	0,28	0,19	0,50	0,21	0,32
$t_{c1}, ^\circ\text{C}$	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
$d_2, \text{ м}$	0,39	0,55	0,38	0,60	0,36	0,39	0,41	0,63	0,45	0,46
$L, \text{ м}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_\tau, \text{ Вт}$	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500	3750	4000	4250

## Глава 9. Конвективный теплообмен

Основные понятия и особенности конвективного теплообмена. Закон Ньютона-Рихмана. Основы теории подобия. Критериальные зависимости. Методика определения коэффициента теплоотдачи в конкретных задачах теплоотдачи.

Процесс переноса тепла в пространстве массой подвижной среды (жидкость или газ) неразрывно связан с особенностями движения среды. Причина естественного движения газа или жидкости – возникновение в ней подъемной силы ввиду разных плотностей нагретой и холодной областей среды. Чем больше разница температур среды, тем выше скорость естественного движения. Вынужденное движение среды обеспечивается работой проталкивания ( $-\mathbf{v}d\mathbf{p}$ ) насосов, вентиляторов, компрессоров и других внешних по отношению к подвижной среде устройств. В зависимости от условий обтекания средой поверхности твердых тел различают ламинарный, турбулентный и переходный режимы движения среды. При обтекании подвижной средой твердых тел на их поверхности образуется пограничный слой среды, в котором и происходит процесс теплоотдачи. Толщина пограничного слоя, режимы движения в ней среды оказывают влияние на процесс теплоотдачи так же, как и расположение в пространстве. Форма и размеры твердого тела, плотность теплового потока.

**Закон Ньютона-Рихмана** связывает плотность потока  $q$  между поверхностью твердого тела и подвижной средой и разность температур поверхности твердого тела  $t_c$  и подвижной среды  $t_{ж}$ :

$$q = \alpha(t_c - t_{ж}),$$

где  $\alpha$  - коэффициент конвективной теплоотдачи характеризует интенсивность процесса теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·К.

При одной и той же разнице температур  $\Delta t = t_c - t_{ж}$  в зависимости от  $\alpha$  величина  $q$  будет разной. Обычно  $t_c$  и  $t_{ж}$  известны, следовательно, для определения  $q$  необходимо определить  $\alpha$  для конкретного случая теплоотдачи.

Однако  $\alpha$  не физическое свойство тела. А величина, зависящая от большого количества факторов. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена может быть решена (для нахождения  $\alpha$ ) с определенными упрощениями для ограниченного числа простейших случаев теплоотдачи. Получение численных значений  $\alpha$  из эксперимента на натуре экономически невыгодно: необходимо провести громадное количество опытов, чтобы выяснить влияние на  $\alpha$  каждого из факторов (взаимосвязанных), в конечном итоге получить  $\alpha$  лишь для этого частного случая теплоотдачи.

Выход в использовании теории подобия. Во-первых, она позволяет результаты опытов на модели распространить на все подобные явления, во-вторых, основываясь на системе дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, отчетливо определяет условия подобия физических явлений и процессов.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от многих факторов представляется в виде критериальных зависимостей, полученных обобщением экспериментальных данных.

Процессы теплообмена при вынужденном и естественном движении среды протекают по-разному, поэтому критериальное уравнение для теплоотдачи при естественной конвекции имеет вид

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^m, \quad (6)$$

а для случая вынужденной конвекции

$$Nu = C Re^m Pr^n, \quad (7)$$

где  $C, m, n$  - постоянные величины для одного класса подобных процессов, зависят от режима движения среды:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot \ell}{\lambda_{ж}} - \text{критерий Нуссельта, характеризует интенсивность}$$

теплоотдачи, содержат искомый коэффициент теплоотдачи;

$$Gr = \frac{g \cdot \beta_{ж} (t_c - t_{ж}) \ell^3}{\nu_{ж}^2} - \text{критерий Грассгофа, характеризует соотношение}$$

подъемной силы и силы вязкости при естественном движении среды;

$$Re = \frac{W \cdot \ell}{\nu_{ж}} - \text{критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил}$$

инерции и сил вязкости при вынужденном движении среды, определяет режим движения среды;

$Pr = \frac{\nu_{ж}}{a_{ж}}$  - критерии Прандтля, критерий физических свойств, приводятся

в таблицах теплофизических свойств.

В критерии подобия входят следующие величины:

$\ell$  - определяющий размер твердого тела, м;

$\lambda_{ж}$  - коэффициент теплопроводности подвижной среды, Вт/(м·К);

$g$  - ускорение свободного падения, 9,81 м/с<sup>2</sup>;

$\nu_{ж}$  - коэффициент кинематической вязкости подвижной среды, м<sup>2</sup>/с;

$W$  - скорость вынужденного движения подвижной среды, м/с;

$a_{ж}$  - коэффициент температуропроводности подвижной среды, м<sup>2</sup>/с.

Для определения численного значения  $\alpha$  в конкретной задаче теплоотдачи необходимо: а) уяснить вид конвекции и режим движения подвижной среды; б) исходя из численных значений **Re** или **Gr·Pr** выбрать конкретные значения **C, m, n**; в) используя (6) или (7), определить численное значение **Nu**; г) рассчитать  $\alpha = Nu \cdot \lambda_{ж} / \ell$ . При расчете критериев подобия необходимо представлять, что является определяющей температурой и определяющим размером, какой физический смысл критериев подобия.

Какая температура:  $t_c$ ,  $t_{ж}$  или  $(t_c + t_{ж})/2$  выбрана в качестве определяющей,  $t_{опр}$  указывает индекс критериев подобия. По  $t_{опр}$  из таблиц теплофизических свойств (см. например [4, 5, 10]) определяются  $\lambda_{ж}$ ,  $\nu_{ж}$ ,  $\beta_{ж}$  для подвижной среды. Определяющий размер  $\ell$  - тот размер твердого тела, который оказывает наибольшее влияние на характер движения среды, на теплоотдачу.

**Задача 9.** Нагрев воды осуществляется горизонтально расположенной трубой длиной  $L=1,5$  м, диаметром  $d$ , мм, и температурой поверхности  $t_c$ , °С. Температура воды вдали от трубы  $t_{ж}=20$ °С. Определить количество тепла, передаваемого от трубы к воде.

Исходные данные приведены в табл.5.

Таблица 5

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d, мм	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Z	0	1	2		3	4	5	67	8	9
$t_c$ , °С	100	90	85	80	99	89	81	75	79	71

**Задача 10.** Воздух пропускается со скоростью  $W$  м/с через трубы  $t_{ж}=30$ °С. Определить коэффициент теплоотдачи и удельный тепловой поток, если длина трубы  $L_m$ .

Исходные данные приведены на табл.6.

Таблица 6

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
W, м/с	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5
Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
L, м	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,98

## Глава 10. Теплоперенос излучением

Основные понятия теплового излучения. Законы теплового излучения. Лучистый теплообмен между телами различной формы и взаимного расположения в пространстве. Экраны. Теплообмен излучающих газов с твердой оболочкой.

В отличие от теплопроводности и конвекции в процессе теплообмена излучением происходит двойное превращение энергии – сначала внутренней энергии излучающего тела в энергию электромагнитных волн, а потом энергии этих волн во внутреннюю энергию поглощающего тела (поглощение).

Таким образом, обмен теплотой зависит от поглощательной, отражательной и пропускательной способностей тел, участвующих в теплообмене и имеющих разную температуру. Если температуры тел одинаковы, то они и излучают и поглощают энергию, но для каждого из них количество поглощаемой энергии равно количеству излучаемой энергии. По интервалу длин волн видимое световое излучение составляет 0,5 % от всего теплового излучения.

В теплообмене излучением аналогом теплового потока является поток излучения  $Q_{\tau}$  - энергия, излучаемая телом по всем направлениям за единицу времени (секунду), Вт.

Аналог плотности теплового потока – плотность потока излучения  $E$  – поток излучения с единицы поверхности тела, Вт/м<sup>2</sup>.

Излучение энергии может происходить как во всем интервале длин волн – **интегральное излучение** (сплошной спектр излучения), так и в отдельных интервалах длин волн  $\lambda$  - **монохроматическое** (спектральное) излучение (линейчатый, дискретный спектр излучения).

Одной из моделей реальных (серых) тел является абсолютно черное тело (**а.ч.т**). Все величины, относящихся к **а.ч.т**, имеют индекс «0». Например, плотность потока монохроматического излучения  $E_{0\lambda} = dE_0 / d\lambda$ , Вт/м<sup>3</sup>, где  $dE_0$  - энергия интегрального излучения **а.ч.т**, приходящаяся на интервал длин волн  $d\lambda$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Необходимо разобраться с понятиями собственное излучение, эффективное излучение, результирующее излучение, абсолютно белое тело, абсолютно прозрачное тело.

**Законы теплового излучения** (Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа) были получены вначале для **а.ч. т**, а затем перенесены с некоторыми допущениями на реальные серые тела.



**Закон Планка** дает распределение  $E_{0\lambda}$  по длинам волн  $\lambda$  при различных температурах излучающего тела.

**Закон Вина** - с увеличением температуры излучающего тела  $T$  максимальное значение  $E_{0\lambda}$  смещается в сторону более коротких длин волн.

**Закон Стефана-Больцмана** - поток интегрального излучения  $Q_{\tau 0}$  пропорционален абсолютной температуре излучающего тела в четвертой степени.

**Закон Кирхгофа** - чем больше излучательная способность тела  $E$ , тем больше его поглощательная способность  $A$ .

**Лучистый теплообмен между телами** с разной температурой зависит не только от оптических свойств тел, но и от формы и взаимного расположения в пространстве этих тел. Форма и расположение тел в пространстве учитывается приведенной степенью черноты системы тел  $\epsilon_{пр}$  и коэффициентом облученности  $\psi_{1-2}$ .

Для уменьшения лучистого теплообмена на пути излучения помещаются экраны, имеющие малые значения степени черноты  $\epsilon$  и максимально отражающие падающую на них энергию.

Для увеличения лучистого теплообмена повышается степень черноты тел путем создания шероховатой поверхности, например, нанесением краски.

Особенностями теплового излучения (поглощения) энергии газами (трех- и многоатомными) являются: объемность процессов, селективность излучения (поглощения).

**Задача 11.** Между двумя параллельными плоскостями, которые можно считать бесконечными по длине и ширине, происходит лучистый теплообмен. Температура и степень черноты поверхностей пластин соответственно равны  $t_1=927^{\circ}\text{C}$  и  $E_1$ ;  $t_2^{\circ}\text{C}$  и  $E_2=0,5$ . Определить количество тепла, передаваемого  $1\text{ м}^2$  поверхности первой пластины второй.

Исходные данные приведены в табл.7.

Таблица 7

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_1$	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7

## Глава 11. Теплопередача и теплообменные аппараты

Теплопередача (теплопроводность при граничных условиях третьего рода). Пути увеличения и уменьшения коэффициента теплопередачи. Виды теплообменных аппаратов. Уравнение теплового баланса и теплопередачи. Средний температурный напор при различных схемах движения теплоносителей.

**Теплопередача** – процесс переноса тепла от одной подвижной среды к другой через разделяющее их твердое тело, состоит из трех процессов: а)

теплоотдача от горячего теплоносителя к поверхности тела; б) теплопроводность через твердое тело; в) теплоотдача от другой поверхности твердого тела к холодному теплоносителю.

Если теплопередача рассматривается как частный случай теплопроводности (при граничных условиях 3-го рода), то значения температур теплоносителей  $t_{ж1}$  и  $t_{ж2}$ , коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  заданы и постоянны вдоль поверхностей твердого тела.

Коэффициент теплопередачи  $k$  не является физическим свойством тела, это величина характеризующая интенсивность процесса теплопередачи, поэтому он зависит и от  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\lambda$ , и от размеров твердого тела (например, толщины  $\delta$  плоской стенки).

Численное значение  $k$  должно быть меньше меньшего из численных значений  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\lambda/\delta$  (или  $\sum \lambda_i/\delta_i$  для многослойной плоской стенки).

Поэтому для уменьшения теплопередачи надо уменьшать меньшее из указанных величин. Использование тепловой изоляции для труб приводит к уменьшению передачи тепла теплопроводностью, но в это же время увеличение внешней поверхности (диаметра) трубопровода приводит к росту  $\alpha_2$ . Поэтому материал изоляции должен удовлетворять условию  $\lambda_{из} \leq \alpha_2 d_2/2$ . Только в этом случае нанесение тепловой изоляции уменьшает тепловые потери с наружной поверхности.

Для увеличения теплопередачи увеличивают поверхность твердого тела со стороны меньшего  $\alpha$  (путем оребрения), используют более теплопроводное твердое тело, повышают  $\alpha$  увеличением скорости движения подвижной среды (вентилятор).

Теплообменный аппарат – устройство для передачи тепла от горячего теплоносителя к холодному. В процессе передачи тепла температура горячего теплоносителя уменьшается от  $t_1'$  до  $t_1''$ , а температура холодного теплоносителя увеличивается от  $t_2'$  до  $t_2''$ .

Если тепловые потери отсутствуют, то выполняется уравнение теплового баланса:

$$M_{\tau 1} \cdot C_{p1}(t_1' - t_1'') = M_{\tau 2} C_{p2}(t_2'' - t_2') = Q_{\tau}, (Вт),$$

где  $Q_{\tau}$  - тепловой поток между горячим и холодным теплоносителями, с массовыми расходами  $M_{\tau}$  и теплоемкостями  $C_p$ .

Так как разница температур теплоносителей при их движении в теплообменнике меняется, то в уравнение теплопередачи теплообменника входит не постоянная разница  $(t_{ж1} - t_{ж2})$ , а среднее значение температурного напора  $\Delta t$ . Кроме того,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\lambda$  зависят от температуры, поэтому  $k$  меняется по поверхности теплообменника  $F$ .

Поэтому для теплообменника:

$$Q_{\tau} = \bar{k} \cdot F \cdot \Delta \bar{t},$$

где  $k$  - средний коэффициент теплопередачи, определяемый по формуле:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}};$$

$F$ - поверхность теплообмена между холодным и горячим теплоносителями;

$\Delta t$  - среднелогарифмический температурный напор:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}.$$

**Задача 12.** Определить коэффициент теплопередачи  $k$  и тепловой поток от кипящей воды температурой  $t_{\text{ж1}}$  к воздуху температурой  $t_{\text{ж2}}=20$  °С, если они разделены стенкой двухслойной трубы внутреннего диаметра  $d_1$  и наружного диаметра  $d_2 = (d_1 + 2\delta_{\text{из}})$ . Принять толщину изоляции  $\delta_{\text{из}} = 0,1$  м.

Таблица 8

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{\text{ж1}}, ^\circ\text{C}$	110	130	150	170	190	210	230	250	270	290
Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d_1, \text{м}$	0,13	0,44	0,15	0,36	0,17	0,28	0,19	0,5	0,21	0,32

Таблица 9

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вопросы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	25	24	23	27	28	30	29	31	32	33
	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
	43	44	45	46	47	36	38	42	37	36
	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
Z	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вопросы	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	72	73	74	75	76	77	78	79	75	62
	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99
	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
	110	111	112	113	114	115	116	110	111	112

## Контрольные вопросы

1. Какие параметры называются термическими, как они определяются и какова их размерность?
2. В какой зависимости находятся между собой давление, температура и объем?
3. Что такое кмоль, какова его единица измерения? Что больше кмоль азота или водорода, почему?
4. Физический смысл частной и универсальной газовой постоянных, их размерность и взаимосвязь.
5. Какой газ называется идеальным. При каких условиях некоторые реальные газы ведут себя как идеальные?
6. Для каких газов коэффициент сжимаемости  $z=1$ , почему?
7. Что называется газовой смесью и как задается состав смеси?
8. Какие доли газовой смеси численно равны друг другу?
9. Сформулируйте закон Дальтона.
10. Как определить кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную смеси?
11. Как ведут себя в смеси ее компоненты?
12. Для городского и сельского воздуха газовые постоянные одинаковы. Почему?
13. Что называется теплоемкостью, чему она численно равна?
14. Какие виды удельной теплоемкости знаете, какова их размерность?
15. В каких термодинамических процессах теплоемкость имеет смысл и есть ли между ними взаимосвязь?
16. В каком процессе теплоемкость равна нулю и почему?
17. Может ли теплоемкость газа быть равной  $\pm\infty$ ?
18. Какая теплоемкость больше - изобарная или изохорная и почему?
19. Что больше по численному значению массовая изобарная теплоемкость или мольная изохорная теплоемкость одной и той же газа?
20. Почему объемная теплоемкость относится к  $1 \text{ м}^3$  при нормальных условиях, а не при любых?
21. Как определить массовую изобарную теплоемкость смеси?
22. Почему для одинакового изменения температуры тела в изобарном и изохорном процессах необходимо подводить различное количество тепла?
23. Как определить мольную изохорную теплоемкость смеси?
24. Получите уравнение Майера из первого закона термодинамики для изобарного процесса идеального газа.
25. Что понимается под внутренней энергией идеального и реального газа?
26. Является ли внутренняя энергия функцией состояния или процесса?
27. Какие существуют методы передачи внутренней энергии?

28. Чему равно изменение внутренней энергии в круговом процессе?
29. Что называется работой расширения?
30. Что такое теплота?
31. Формулировка первого закона термодинамики и его аналитическое выражение
32. Что такое энтальпия?
33. Уравнение первого закона термодинамики (с использованием энтальпии).
34. В чем заключается физический смысл энтальпии?
35. Дать определение основным термодинамическим процессам?
36. Показать на  $P\upsilon$  диаграмме: изохору, изобару, изотерму и адиабату и написать их уравнения.
37. Для какого процесса в  $P\upsilon$  диаграмме можно графически определить подведенную теплоту к телу?
38. Для какого процесса в  $P\upsilon$  диаграмме можно графически определить изменение внутренней энергии?
39. В каком процессе работа изменения объема равна работе изменения давления?
40. Как определить изменение внутренней энергии тела в любом термодинамическом процессе?
41. Как определить изменение энтальпии тела в любом термодинамическом процессе?
42. Почему для одинакового изменения температуры тела в изохорном и изобарном процессах необходимо подводить разное количество тепла?
43. Почему при адиабатном расширении тела его температура убывает, а при сжатии увеличивается?
44. Почему в  $P\upsilon$  диаграмме адиабата круче диаграммы?
45. Как определить изменение энтропии во всех термодинамических процессах?
46. Какой процесс называется политропным?
47. При каком условии основные процессы будут политропными?
48. Что называется фазой и фазовым переходом? Какие бывают фазовые переходы?
49. Какой фазовый переход называется прямым и обратным?
50. Что называется кипением, испарением и парообразованием?
51. Какой пар называется насыщенным? Виды насыщенного пара?
52. Какой пар называется перегретым? Что такое степень перегрева?
53. Что такое степень сухости? В каких пределах меняется и какой пар характеризует степень сухости?
54. Что называется теплотой парообразования и как она меняется в зависимости от давления насыщения?

55. Какая точка называется критической? Чему равна теплота парообразования в критической точке?
56. Почему температура влажного насыщенного пара не меняется в процессе парообразования, несмотря на подвод тепла?
57. Каково соотношение температур сухого насыщенного и влажного пара при одном давлении?
58. Удельный объем какого пара при одинаковом давлении больше: сухого насыщенного или перегретого?
59. Что больше для данного тела: температура сублимации или температура конденсации.
60. При каких термодинамических условиях происходит процесс парообразования?
61. Как определяется удельный объем, энтальпия и энтропия влажного насыщенного пара?
62. Что называется теплопроводностью?
63. Что называется тепловым потоком и плотностью теплового потока, и какова их размерность?
64. Что называется градиентом температуры, его единица измерения?
65. Сформулируйте и приведите уравнение закона Фурье.
66. Почему в уравнении закона Фурье стоит знак «минус»?
67. Что называется коэффициентом теплопроводности, его численное значение и размерность.
68. Что называется температурным полем? Напишите уравнение двумерного нестационарного температурного поля?
69. Как определить тепловой поток, проходящий через плоскую одно- и многослойной стенки?
70. Приведите уравнение теплопроводности цилиндрической одно- и многослойной стенки.
71. Что называется тепловой проводимостью и тепловым сопротивлением?
72. Почему для цилиндрической стенки определяется линейная плотность теплового потока?
73. Зависит ли коэффициент теплопроводности от молекулярной массы газов, почему?
74. Рассматривая дно чайника, как двухслойную плоскую стенку, объясните необходимость удаления накипи?
75. Коэффициент теплопроводности влажного или перегретого пара больше?
76. Зависит ли коэффициент теплопроводности от градиента температуры и от плотности теплового потока в теле?
77. Что называется конвективной теплоотдачей?
78. Что называется конвекцией и какие различают виды конвекции?

79. Что называется пограничным слоем и какие виды пограничного слоя известны?
80. Какими могут быть режимы движения жидкости?
81. Основной закон конвективного теплообмена?
82. Что называется коэффициентом теплоотдачи, какова его размерность, от каких величин зависит  $\alpha$ ?
83. Почему коэффициент теплоотдачи изменяется по поверхности вертикальной пластины?
84. При каком движении среды коэффициент теплоотдачи больше и почему?
85. Почему для определения коэффициента теплоотдачи применяют теорию подобия?
86. Что называется определяющей температурой и определяющим размером?
87. Когда определяется число Рейнольдса?
88. Число Грасгофа когда и как определяется?
89. Почему в жидкости нагретое тело быстрее остывает, чем на воздухе даже при равенстве температур жидкости и воздуха?
90. Почему шахматное расположение труб в пучке способствует улучшению конвективного теплообмена?
91. Почему при пузырьковом кипении коэффициент теплоотдачи больше чем при пленочном кипении?
92. Что называется излучением?
93. Какие лучи называются тепловыми?
94. Какое излучение называется монохроматическим и интегральным?
95. Какие тела называются абсолютно черным, белым и прозрачным?
96. Что такое степень черноты и в каких пределах она изменяется?
97. Какое тело называется серым телом?
98. Что называется селективным излучением?
99. Какие тела обладают сплошным спектром излучения?
100. Закон Планка и его графическое изображение?
101. Закон Вина?
102. Закон Стефана – Больцмана. Коэффициент излучения абсолютно черного тела.
103. Закон Кирхгофа.
104. Теплообмен излучениями между твердыми телами.
105. Что называется экраном и как экранирование влияет на теплообмен излучением?
106. Что называется теплопередачей?
107. Какими методами передается теплота при теплопередаче?
108. 108. Каким уравнением описывается уравнение теплопередачи плоской стенки?

109. Что называется общим термическим сопротивлением теплопередачи и из каких величин оно складывается?
110. Как определяется температуры поверхностей стенки?
111. Что называется критической толщиной изоляции?
112. Какие требуются условия, чтобы изоляция уменьшила теплопотери?
113. Что называется теплообменным аппаратом?
114. Какие виды теплообменных аппаратов известны?
115. По каким схемам осуществляется движение теплоносителей?
116. Как определяется средняя разность температур теплоносителей?



## Список литературы

1. Нащекин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1980.
2. Теплотехника. Под ред. Баскакова А.П.. М.: Энергоиздат, 1991.
3. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
4. Кирилин В.А. и др. Техническая термодинамика. М.: Энергия, 1974.
5. Михеев М.А., Михеева Н. М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.
6. Теплотехника. Под ред. Луканина В.Н. М.: Высшая школа, 2000.
7. Теплотехника. Под ред. Матвеева Г. А. М.: Высшая школа, 1981.
8. Теплотехника. Под ред. Крутова В. И. М.: Машиностроение, 1986.
9. Данилова Г. И. и др. Сборник задач по процессам теплообмена в пищевой и холодильной промышленности. М.: Агропромиздат, 1986.
10. Краснощеков Е.А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. М.: Энергия, 1975.
11. Афанасьева В. Н. и др. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена. Под ред. Крутова В. И. и Петражицкого Г. Б. М.: Высшая школа, 1986.
12. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. М.: Машиностроение, 1973.
13. Андрианова Т. Н. и др. Сборник задач по технической термодинамике. М.: Энергоиздат, 1981.
14. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Энергия, 1972.
15. Ривкин С. Л. , Александров А. А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1975.
16. Приложение к контрольным заданиям. ФПИ.: Фрунзе, 1990.

Корректор *Эркинбек к. Ж.*  
Редактор *Турдукулова А.К.*  
Тех.редактор *Кочоров А.Д*

---

Подписано к печати 10.07.2015 г. Формат бумаги 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офс. Печать офс. Объем 1,5 п.л. Тираж 50 экз. Заказ 344. Цена 25,65с.  
Бишкек, ул. Сухомлинова, 20. ИЦ “Текник” КГТУ им. И.Раззакова, т.: 54-29-43  
е-mail: [beknur@mail.ru](mailto:beknur@mail.ru)



