

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия»

Инженерный факультет

Кафедра «Энергообеспечение в агропромышленном комплексе»

## **ТЕПЛОТЕХНИКА**

**Задания и методические указания по выполнению  
контрольной работы для студентов заочной формы обучения по  
направлению 110800- «Агроинженерия» и специальностям:  
110804.65 - «Технология обслуживания и ремонта машин в АПК»;  
110801.65 «Механизация сельского хозяйства»**

**Составитель: Машиев Ч.Г.**

Якутск, 2012 г.



## Методические указания по выполнению заданий контрольной работы

**Цель** выполнения контрольной работы – закрепление и проверка знаний, полученных студентами в процессе изучения дисциплины «Теплотехника».

Контрольная работа студента состоит из 2 (двух) частей:

Часть I – Задачи.

Часть II – Контрольные вопросы.

Контрольная работа выполняется каждым студентом по своему **варианту** и оформляется на листах А4 с титульным листом.

**№ варианта** – последняя цифра в номере зачетной книжки

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО «Якутская государственная сельскохозяйственная академия»

Факультет \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА  
по дисциплине: «Теплотехника»

Выполнил: \_\_\_\_\_  
Фамилия Имя Отчество

\_\_\_\_\_  
курс, группа

\_\_\_\_\_  
номер зачетной книжки

Проверил: \_\_\_\_\_  
Фамилия, И.О.

\_\_\_\_\_  
ученая степень, должность

Якутск, 2012 г

## **ВВЕДЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ФОРМУЛЫ**

**Теплотехника** – наука, которая изучает способы и методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепло- и парогенераторов, тепловых и холодильных машин, аппаратов и устройств.

Теоретическими основами теплотехники являются техническая термодинамика и теория теплообмена. Их разработка необходима для установления наиболее рациональных способов использования теплоты, анализа экономичности рабочих процессов тепловых установок и создания новых, наиболее совершенных типов тепловых двигателей и агрегатов.

Технической термодинамикой называется наука о свойствах тепловой энергии и законах взаимопреобразования тепловой и механической энергии.

Термодинамика основывается на двух экспериментально установленных законах, получивших название первого и второго начал термодинамики.

Теория теплообмена — это наука о процессах переноса теплоты.

Теплообмен представляет собой сложный процесс, в котором для простоты изучения различают три элементарных процесса теплообмена – теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Процесс теплопроводности происходит при непосредственном соприкосновении (соударении) частиц вещества (молекул, атомов и свободных электронов), сопровождающемся обменом энергии и их тепловым движением.

Процесс конвекции происходит лишь в жидкостях и газах и представляет собой перенос теплоты в результате перемещения и перемешивания частиц жидкости или газа. Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью.

Процесс теплового излучения состоит в переносе теплоты от одного тела к другому электромагнитными волнами, возникающими в результате сложных молекулярных и атомных возмущений.

### **РАБОЧЕЕ ТЕЛО И СМЕСИ ГАЗОВ**

Физическое состояние рабочего тела определяется тремя параметрами состояния: температурой  $T(t)$ , давлением  $p$ , удельным объемом  $v$ .

**Температура** характеризует тепловое состояние тела и измеряется в градусах. Численное значение температуры зависит от принятой температурной шкалы.

Единица измерения температуры по абсолютной (или термодинамической) шкале, применяемой в международной системе измерений СИ — градус Кельвина  $T$ , [ K ].

Единица измерения температуры по шкале Цельсия (международная практической шкала) — градус Цельсия  $t$ , [°C].

$$T(\text{K}) = t(\text{°C}) + 273,15.$$

**Давление** — это сила, действующая по нормали на единицу поверхности. Единицей измерения давления в системе СИ является паскаль (Па), представляющий давление силы в 1 ньютон на площадь в  $1 \text{ м}^2$ , т. е.  $1 \text{ Н/м}^2$ . Давление измеряется манометрами, если оно больше атмосферного, или вакуумметрами, если меньше.

Абсолютное давление  $p_{абс}$ , определяется как сумма барометрического давления (показания барометра) и избыточного давления (показания манометра):

$$p_{абс} = p_{бар} + p_{ман}$$

где  $p_{ман}$  — показание манометра, измеряющего избыточное давление.

Если давление внутри какого-либо рассматриваемого сосуда или емкости меньше атмосферного давления окружающей этот сосуд или емкость среды ( $p_{абс} < p_{бар}$ ), то абсолютное давление  $p_{абс}$  определяется как разность барометрического давления (показания барометра) и разрежения (показания вакуумметра):

$$p_{абс} = p_{бар} - p_{вак}$$

где  $p_{вак}$  — показание вакуумметра, измеряющего разрежение.

**Удельный объем** рабочего тела, или объем единицы массы,

$$v = \frac{V}{G} \quad (\text{м}^3/\text{кг}) \quad - \text{ т.е. обратно пропорционально плотности } \rho = \frac{G}{V}$$

где  $V$  и  $G$  — соответственно объем тела,  $\text{м}^3$  и его масса, кг.

Нормальные физические условия соответствуют  $t_n = 0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ К}$  и  $p_n = 101325 \text{ Па}$  (или  $\text{Н/м}^2$ ) = 760 мм рт. ст.

**Уравнение состояния** рабочего тела (газа) устанавливает зависимость между параметрами состояния. Для идеального газа уравнение состояния выражается законом Клапейрона:

а) для 1 кг газа

$$pv = RT$$

где  $R$  — газовая постоянная;

б) для  $G$ , кг газа

$$pV = GRT$$

**Таблица 1**

**Значения  $\mu$  и  $R$  для некоторых газов**

газ	Химическая формула	Молекулярная масса $\mu$ , кг/кмоль	Газовая постоянная, $R$ , Дж/(кг К)
Воздух	-	28,950	287,195
Кислород	O <sub>2</sub>	31,999	259,829
Азот	N <sub>2</sub>	28,013	296,015
Водород	H <sub>2</sub>	2,014	4128,252
Оксид углерода	CO	28,0105	296,827
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44,010	188,918
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,030	488,215
Аргон	Ar	39,948	208,128
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,015	461,512
Метан	CH <sub>4</sub>	16,043	518, 251
Гелий	He	4,0026	2077,224

## ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики: при осуществлении термодинамического процесса подводимая к телу теплота  $Q$  идет на изменение его внутренней энергии  $\Delta U$  и совершение механической работы  $L$ :

$$Q = \Delta U + L$$

Для 1 кг рабочего тела

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

**Таблица 2**

### Термодинамические процессы

Процесс	Соотношения между параметрами $p\nu = RT$	Механическая работа $dl = p d\nu$	Теплота $dq = c \cdot dT$
Изохорный $\nu = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ или $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$l = 0$	$q = c_v (T_2 - T_1)$
Изобарный $p = const$	$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{T_1}{T_2}$ или $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$l = p (\nu_2 - \nu_1)$ $l = R(T_2 - T_1)$	$q = c_p (T_2 - T_1)$
Изотермический $T = const$ $p\nu = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1}$ или $\frac{p_2}{p_1} = \frac{\nu_1}{\nu_2}$	$l = RT \cdot \ln \frac{\nu_2}{\nu_1}$ $l = RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$	$q = l$
Адиабатный $p\nu^k = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)^k$ $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)^{k-1}$ $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{k-1}}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	$l = \frac{p_1 \nu_1 - p_2 \nu_2}{k-1}$ $l = \frac{R \cdot (T_1 - T_2)}{k-1}$	$q = 0$
Политропный $p\nu^n = const$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)^n$ $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\nu_2}{\nu_1}\right)^{n-1}$ $\frac{\nu_2}{\nu_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$ $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$ $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{n}{n-1}}$	$l = \frac{p_1 \nu_1 - p_2 \nu_2}{n-1}$ $l = \frac{R \cdot (T_1 - T_2)}{n-1}$	$q = c_v \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1)$

**Соотношения между единицами Международной системы (СИ) и другими единицами физических величин**

1 мм рт. ст. = 133,3 Па  
 1 мм вод. ст. = 10 Па  
 1 кгс/см<sup>2</sup> = 98066,5 Па  
 1 бар = 0,1 МПа = 100 000 Па  
 1 МПа = 1 000 000 Па = 1 000 кПа = 10<sup>6</sup> Па  
 1 л = 10<sup>-3</sup> м<sup>3</sup>  
 1 Вт = 1 Дж/с  
 1 кВт·ч = 3600 кДж  
 1 ккал = 4,1868 кДж  
 1 кДж = 0,239 ккал  
 1 л.с. = 0,736 кВт  
 1 кВт = 1,36 л.с.  
 1 т/ч = 0,278 кг/с  
 1 кгс = 10 Н

к – кило = 1000 = 10<sup>3</sup>  
 М – мега = 1 000 000 = 10<sup>6</sup>  
 Г – гига = 1 000 000 000 = 10<sup>9</sup>

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛООБМЕНА**

Количество теплоты  $Q$  и плотность теплового потока  $q$ , проходящей в единицу времени:

- через однородную плоскую стенку

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \cdot F \quad [ \text{Вт} ] \quad \text{и} \quad q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \quad [ \text{Вт/м}^2 ]$$

- через многослойную плоскую стенку

$$Q = \frac{(t_1 - t_{n+1})}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \cdot F \quad [ \text{Вт} ] \quad \text{и} \quad q = \frac{(t_1 - t_{n+1})}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad [ \text{Вт/м}^2 ]$$

где  $\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности материала стенки (слоя), Вт/(м·К);

$t_1$  и  $t_2$  (или  $t_{n+1}$ ) — температуры поверхностей стенки, °С;

$F$  — площадь стенки, м<sup>2</sup>;

$\delta_i$  — толщина стенки (слоя), м.

Температура на поверхности слоев стенки:

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} \quad t_3 = t_2 - q \frac{\delta_2}{\lambda_2} \quad \text{или} \quad t_3 = t_1 - q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right) \quad \text{и т.д.}$$

Количество теплоты, передаваемой от одного теплоносителя к другому через разделяющую стенку в единицу времени:

$$Q = k \cdot (t_{жс1} - t_{жс2}) \cdot F \quad [ \text{Вт} ]$$

где  $k$  — коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$t_{жс1}$  и  $t_{жс2}$  — температуры теплоносителей, °С.

Плотность теплового потока при теплопередаче:

$$q = \frac{t_{жс1} - t_{жс2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [ \text{Вт/м}^2 ]$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - коэффициенты теплоотдачи на поверхностях стенки, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала стенки, Вт/(м·К)

$\delta$  — толщина стенки, м

Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) через плоскую однородную стенку

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [ \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} ]$$

Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) для многослойной плоской стенки

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [ \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} ]$$

Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) через цилиндрическую стенку

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}} \quad [ \text{Вт/(м} \cdot \text{К)} ]$$

где  $d_1$  и  $d_2$  — внутренний и наружный диаметр цилиндрическую стенку, м.

# Часть I. ЗАДАЧИ

## Методические указания к решению задач

Данные каждой задачи по вариантам приведены в таблице сразу после описания условия этой задачи (**№ варианта – последняя цифра в номере зачетной книжки**).

Решение задач сопровождать краткими пояснениями и подробными вычислениями. Обязательно для всех заданных и полученных в ходе решения значений должны быть указаны их единицы измерения.

### Пример 1:

Дано:		Решение:
$q = 100$ кДж		1) $q = \Delta u + l \Rightarrow \Delta u = q - l = 100 - 75 = 25$ кДж
$l = 75$ кДж		2) Найдем теплоемкость для воздуха

----- |  $c_v = \frac{20,93}{\mu_{\text{воздуха}}} = \frac{20,93}{28,95} = 0,722$  кДж/(кг·К)

Найти:  $\Delta t = ?$  | 3)  $\Delta u = c_v \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta u}{c_v} = \frac{25}{0,722} = 34,62$  °С

Ответ:  $\Delta t = 34,62$  °С

### Пример 2:

Дано:

$$t_2 = 1170 \text{ °С}$$

$$t_6 = 120 \text{ °С}$$

$$\alpha_1 = 45 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

$$\alpha_2 = 5950 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

$$\delta = 15 \text{ мм} = 0,015 \text{ м}$$

$$\lambda = 51 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

-----  
 $q = ? \quad t_{c1} = ? \quad t_{c2} = ?$

Решение:

1) находим коэффициент теплопередачи  $k$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{45} + \frac{0,015}{51} + \frac{1}{5950}} = \frac{1}{0,0222222 + 0,0002491 + 0,0001681} = \frac{1}{0,0226844} = 44,082 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

2) находим плотность теплового потока  $q$

$$q = k \cdot (t_{жс1} - t_{жс2}) \quad \text{где } t_{жс1} = t_2 \text{ и } t_{жс2} = t_6$$

$$q = 44,082 \cdot (1170 - 120) = 44,082 \cdot 1050 = 46286,1 \text{ Вт/м}^2$$

3) находим  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$

$$t_{c1} = t_{жс1} - q \frac{1}{\alpha_1} = 1170 - \frac{46286,1}{45} = 1170 - 1028,6 = 141,4 \text{ °С}$$

$$t_{c2} = t_{ж2} + q \frac{1}{\alpha_2} = 120 + \frac{46286,1}{5950} = 120 + 7,8 = 127,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ответ:  $q=46286,1 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{c1}=141,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $t_{c2}=127,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

## ЗАДАЧИ

**Задача 1.** При барометрическом давлении  $p_{бар1}$ , мм рт. ст., манометр, установленный на баллоне с газом, показывает  $p_{ман1}$ , кгс/см<sup>2</sup>. Как изменится показание манометра  $p_{ман2}$ , если барометрическое давление упадет до  $p_{бар2}$ , мм рт.ст.?

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$p_{бар1}$ мм рт.ст	760	759	758	757	756	755	754	753	752	751
$p_{бар2}$ мм рт.ст	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739
$p_{ман1}$ , кгс/см <sup>2</sup>	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38

*Решение:*

1) Переведем все заданные значения давления из [мм. рт. ст.] и [кгс/см<sup>2</sup>] в Паскали [Па] (см. табл. 3). Чтобы перевести  $p_{бар}$ , заданное в [мм. рт. ст.], в [Па] необходимо умножить заданную величину  $p_{бар}$  на 133,3. Чтобы перевести  $p_{ман}$ , заданное в [кгс/см<sup>2</sup>], в [Па] необходимо умножить заданную величину  $p_{ман}$  на 98066,5.

2) Определим абсолютное давление в баллоне с газом:

$$p_{абс} = p_{бар1} + p_{ман1}$$

3) Показания манометра  $p_{ман2}$  при изменении барометрического (атмосферного) давления будет:

$$p_{ман2} = p_{абс} - p_{бар2}$$

**Задача 2.** Какое количество воздуха должно быть подано компрессором в баллон емкостью  $V$ , л, чтобы при температуре  $t$ , °C абсолютное давление в нем повысилось с  $p_{абс1}$ , МПа до  $p_{абс2}$ , МПа?

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$V$ , л	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47
$t$ , °C	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$p_{абс1}$ , МПа	1	1,15	1,3	1,45	1,6	1,75	1,9	2,05	2,2	2,35
$p_{абс2}$ , МПа	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,3	3,6	3,9	4,2

*Решение:* Необходимо найти количество воздуха  $\Delta G = G_2 - G_1$ , кг

Уравнение Клапейрона  $pV = GRT \Rightarrow$

$$\Delta G = G_2 - G_1 = \frac{p_2 V}{RT} - \frac{p_1 V}{RT} = (p_2 - p_1) \frac{V}{RT}$$

где  $R$  – газовая постоянная воздуха (см. табл.1)

$$T = t + 273,15, \quad K$$

**Задача 3.** Два кислородных баллона одинакового объема соединены трубопроводом. Определить давление, которое установится в баллонах при температуре  $t_{общ}$ , °С, если до соединения параметры газа в первом баллоне были  $p_{абс1}$ , МПа и  $t_1$ , °С, а во втором —  $p_{абс2}$ , МПа и  $t_2$ , °С.

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$t_{общ}$ , °С	23	24	25	26	27	28	27	26	25	24
$p_{абс1}$ , МПа	7	7,3	7,6	7,9	8,2	8,5	8,8	9,1	9,4	9,7
$p_{абс2}$ , МПа	5	5,2	5,4	5,6	5,8	6	6,2	6,4	6,6	6,8
$t_1$ , °С	30	30	31	31	32	32	33	33	34	34
$t_2$ , °С	20	19	18	17	16	15	16	17	18	19

*Решение:*

Сначала выведем формулу для определения массы кислорода в обоих баллонах  $G_{общ} = G_1 + G_2$

$$G_{общ} = \frac{p_1 V_1}{RT_1} + \frac{p_2 V_2}{RT_2} \Rightarrow G_{общ} = \left( \frac{p_1}{T_1} + \frac{p_2}{T_2} \right) \times \frac{V_{1,2}}{R} \quad \text{т.к. по условию } V_{1,2} = V_1 = V_2 = const$$

Давление в баллонах после их соединения, то есть, получая  $V_{общ} = 2 \cdot V_{1,2}$ , определим по формуле:

$$p = \frac{G_{общ} RT_{общ}}{V_{общ}} = \frac{G_{общ} RT_{общ}}{2V_{1,2}} \Rightarrow p = \left( \frac{p_1}{T_1} + \frac{p_2}{T_2} \right) \cdot \frac{V_{1,2}}{R} \cdot \frac{RT_{общ}}{2 \cdot V_{1,2}} = \left( \frac{p_1}{T_1} + \frac{p_2}{T_2} \right) \cdot \frac{T_{общ}}{2}$$

**Задача 4.** Определить расход метана  $G$ , кг/с, в газопроводе диаметром  $d$ , мм, если скорость газа  $w$ , м/с, абсолютное давление  $p_{абс}$ , МПа и температура  $t$ , °С.

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$d$ , мм	800	800	750	750	700	700	650	650	600	600
$w$ , м/с	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15
$p_{абс}$ , МПа	5	5,2	5,4	5,6	5,8	6	6,2	6,4	6,6	6,8
$t$ , °С	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21

*Решение:* Находим площадь поперечного сечения газопровода (примечание: диаметр газопровода  $d$  должен быть указан в метрах):

$$F = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi d^2}{4} \quad [ \text{м}^2 ]$$

Плотность метана будет равна (обратная величина удельного объема  $v$ )

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad [ \text{кг/м}^3 ]$$

где  $R$  – газовая постоянная метана  $CH_4$ , Дж/(кг·К) - (см. табл.1)

$$\text{Массовый расход метана } G = F \rho w \quad [ \text{кг/с} ]$$

**Задача 5.** Из резервуара емкостью  $V$ , м<sup>3</sup>, содержащего кислород при абсолютном давлении  $p_{абс1}$ , МПа и температуре  $t_1$ , °С, выпущена часть газа. Давление в резервуаре понизилось до  $p_{абс2}$ , МПа и температура до  $t_2$ , °С. Определить количество выпущенного кислорода  $\Delta G$ , кг.

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$V, \text{ м}^3$	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7
$p_{\text{абс1}}, \text{ МПа}$	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8
$p_{\text{абс2}}, \text{ МПа}$	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
$t1, \text{ }^\circ\text{C}$	25	25	25	25	25	27	27	27	27	27
$t2, \text{ }^\circ\text{C}$	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Решение: Необходимо найти  $\Delta G = G_1 - G_2$ , кг

Уравнение Клапейрона  $pV = GRT \Rightarrow$

$$\Delta G = G_1 - G_2 = \frac{p_1 V}{RT_1} - \frac{p_2 V}{RT_2}, \quad \text{кг}$$

где  $R$  – газовая постоянная кислорода (см. табл.1)

**Задача 6.** Гремучий газ по массе состоит из водорода  $g_1$  ( $\text{H}_2$ ) и кислорода  $g_2$  ( $\text{O}_2$ ). Определить объемный состав  $r_{\text{H}_2}$  и  $r_{\text{O}_2}$ , газовую постоянную  $R$  и плотность газа  $\rho$  при барометрическом давлении  $p_{\text{бар}}$ , МПа и температуре  $t$ ,  $^\circ\text{C}$ .

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$g_{\text{H}_2}$	0,111	0,114	0,117	0,12	0,123	0,126	0,129	0,132	0,135	0,138
$g_{\text{O}_2}$	0,889	0,886	0,883	0,88	0,877	0,874	0,871	0,868	0,865	0,862
$p_{\text{бар}}, \text{ МПа}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
$t, \text{ }^\circ\text{C}$	17	17,5	18	18,5	19	19,5	20	20,5	21	21,5

Решение:

Молекулярная масса смеси

$$\mu = \frac{1}{\frac{g_{\text{H}_2}}{\mu_{\text{H}_2}} + \frac{g_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}}} \quad \text{где } g_i \text{ – массовые доли компонентов смеси.}$$

$\mu_i$  – молекулярная масса компонента смеси (см. табл.1)

Газовая постоянная смеси

$$R = \frac{\mu R}{\mu} = \frac{8314}{\mu} \quad [\text{Дж/ (кг} \cdot \text{К)}]$$

Объемные доли:

$$\text{Водорода } r_{\text{H}_2} = g_{\text{H}_2} \cdot \frac{\mu}{\mu_{\text{H}_2}} \quad \text{кислорода } r_{\text{O}_2} = 1 - r_{\text{H}_2}$$

$$\text{Плотность газовой смеси } \rho = \frac{p}{RT} \quad \text{кг/м}^3$$

**Задача 7.** В процессе расширения с подводом  $q$ , кДж теплоты 1 кг воздуха совершает работу, равную  $l$ , кДж. Определить изменение температуры  $\Delta t$  воздуха в процессе, пренебрегая зависимостью теплоемкости от температуры.

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$q, \text{ кДж}$	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170
$l, \text{ кДж}$	92	94	96	98	100	102	104	106	108	110

*Решение:* В соответствии с первым законом термодинамики теплота, подводимая к телу, идет на совершение работы и изменение внутренней энергии тела:  $q = \Delta u + l$

Внутренняя энергия  $\Delta u$  для любого термодинамического процесса определяется по формуле:  $\Delta u = c_v(t_2 - t_1) = c_v \cdot \Delta t$

Теплоемкость при условии независимости от температуры определим по формуле:  $c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,93}{\mu}$  [кДж/(кг·К)]

Рабочим телом в процессе по условию задачи является воздух, значит, найдем молекулярную массу  $\mu$  для воздуха по таблице «Значения  $\mu$  и  $R$  для некоторых газов».

Итого, определив все значения и преобразовав уравнения первого закона термодинамики найдем насколько изменится температура воздуха в процессе:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= c_v \cdot \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta u}{c_v} \\ q &= \Delta u + l \Rightarrow \Delta u = q - l \end{aligned} \right\} \Delta t = \frac{q - l}{c_v}$$

**Задача 8.** В резервуаре емкостью  $V$ , м<sup>3</sup> находится воздух при давлении  $p_1$ , МПа и температуре  $t_1$ , °С. Как изменится температура и давление, если к нему подвести  $Q$ , кДж теплоты?

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$V$ , м <sup>3</sup>	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8	3
$p_1$ , МПа	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,8
$t_1$ , °С	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$Q$ , кДж	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325

*Решение:* Исходя из уравнения Клапейрона  $pV = GRT$  определим массу воздуха по формуле  $G = \frac{pV}{RT}$ , кг

где  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К)

$$T = t + 273,15 \quad [K]$$

Рабочим телом в процессе по условию задачи является воздух, значит, найдем газовую постоянную  $R$ , а также в последующем молекулярную массу  $\mu$  и для воздуха по таблице «Значения  $\mu$  и  $R$  для некоторых газов».

Повышение температуры при подводе теплоты в изохорном процессе определим исходя из уравнения  $Q = G \cdot c_v \cdot \Delta t$

$$\Delta t = \frac{Q}{G \cdot c_v} \Rightarrow t_2 = t_1 + \Delta t$$

Теплоемкость при условии независимости от температуры определим по формуле:  $c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,93}{\mu}$  [кДж/кг·К]

где  $\mu$  - молекулярная масса, кг/кмоль (см. выше)

Полученные значения  $t_1$  и  $t_2$  переведем из градусов Цельсия [°С] в градусы Кельвина [К] по формулам  $T_1 = t_1 + 273,15$  и  $T_2 = t_2 + 273,15$

Для изохорного процесса соотношение между параметрами состояния:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \Rightarrow \quad p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}$$

**Задача 9.** В закрытом резервуаре находится воздух при давлении  $p_1$ , мм рт. ст. и температуре  $t_1$ , °С. Определить, насколько понизится давление в резервуаре, если его охладить до  $t_2$ , °С.

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$p_1$ , мм рт. ст.	732	734	736	738	740	742	744	746	748	750
$t_1$ °С	23	26	29	32	35	38	41	44	47	50
$t_2$ °С	-32	-34	-36	-38	-40	-42	-44	-46	-48	-50

*Решение:*

Значение  $p_1$ , заданное в мм рт. ст. переведем в Паскали [Па].

Значения  $t_1$  и  $t_2$  переведем из градусов Цельсия [°С] в градусы Кельвина [К] по формулам  $T_1 = t_1 + 273,15$  и  $T_2 = t_2 + 273,15$

Процесс изохорный  $v = const$ , следовательно:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad \Rightarrow \quad p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1}$$

**Задача 10.** Теплота сгорания дизельного топлива  $Q$ , кДж/кг. Определить работу в кВт·ч, которую можно получить при использовании его в тепловом двигателе с к.п.д.  $\eta$  %

варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$Q$ , кДж/кг	42100	42200	42300	42400	42500	42600	42700	42800	42900	43000
кпд $\eta$ %	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35

*Решение:* Теплота сгорания дизельного топлива  $Q$ , кДж/кг – это количество тепла, которое может быть получено при сжигании 1 кг топлива. Учитывая, что не все полученное тепло может быть полезно использовано в тепловом двигателе, определим работу исходя из значения к.п.д. этого двигателя.

Также при вычислении следует всегда учитывать, что к.п.д.  $\eta$  задаётся в процентах (%). Это означает, что  $\eta = \frac{\eta\%}{100}$

$$L = \eta \cdot Q \quad [\text{кДж}]$$

Для того, чтобы полученное значение работы  $L$  в кДж перевести в кВт·ч, необходимо поделить её на 3600, исходя из соотношения  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ кДж}$

$$L = \frac{\eta \cdot Q}{3600} \quad [\text{кВт} \cdot \text{ч}]$$

**Задача 11.** Определить коэффициент теплопроводности  $\lambda$  кирпичной стенки печи толщиной  $\delta$ , мм, если температура на внутренней поверхности стенки  $t_{c1}$ , °С и на наружной  $t_{c2}$ , °С. Потери теплоты через стенку  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\delta$ , мм	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330
$t_{c1}$	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325
$t_{c2}$	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
$q$	500	480	460	440	420	400	380	360	340	320

*Решение:*

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  материала стенки, Вт/(м·К), определим исходя из формулы определения плотности теплового потока, проходящего через плоскую однородную стенку:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \Rightarrow \lambda = \frac{q \cdot \delta}{(t_1 - t_2)} \quad [\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})]$$

$t_1$  и  $t_2$  — температуры поверхностей стенки, то есть  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ , °С.

$\delta$  — толщина стенки, м.

*Примечание:* при вычислениях толщина стенки (слоя)  $\delta$  должна быть переведена из [мм] в метры [м].

**Задача 12.** Слой льда на поверхности воды имеет толщину  $\delta$ , мм, температуры на нижней и верхней поверхностях соответственно  $t_1$ , °С и  $t_2$ , °С. Определить тепловой поток через 1 м<sup>2</sup> поверхности льда, если его коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{льда}}$  Вт/(м·К). Как изменится тепловой поток, если лед покроется слоем снега толщиной  $\delta$ , мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{снега}}$  Вт/(м·К) и температура на поверхности снега будет  $t_3$ , °С?

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\delta$ льда мм	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
$\lambda$ льда	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19	2,2	2,21	2,22	2,23	2,24
$t_1$ льда	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_2$ льда	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19
$\delta$ снег мм	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$\lambda$ снег	0,41	0,415	0,42	0,425	0,43	0,435	0,44	0,445	0,45	0,455
$t_3$ снег	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21

*Решение:*

1) Определим тепловой поток через 1 м<sup>2</sup> поверхности льда по формуле:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_1 - t_2) \quad [\text{Вт}/\text{м}^2]$$

2) Определим тепловой поток через 1 м<sup>2</sup> поверхности льда со снегом по

формуле: 
$$q = \frac{(t_1 - t_3)}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad [\text{Вт}/\text{м}^2]$$

**Задача 13.** Определить плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, через плоскую стенку металлического водонагревателя и температуру на поверхностях стенки, если заданы: температура греющих газов  $t_2$ , °С, температура воды в баке  $t_6$ , °С, коэффициенты теплоотдачи соответственно  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), толщина стенки  $\delta$ , мм и коэффициент теплопроводности материала стенки  $\lambda$ , Вт/(м·К).

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$t_2$	1250	1300	1350	1400	1150	1100	1050	1000	950	1200
$t_6$	210	220	230	240	190	175	160	155	140	200
$\alpha_1$	46	47	48	49	44	43	42	41	40	45
$\alpha_2$	6150	6200	6250	6300	5900	5850	5800	5750	5700	6000
$\delta$ мм	16	17	18	20	13	12	11	10	9	14
$\lambda$	56	54	52	50	57	59	61	63	65	58

*Решение:*

1) Определим коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) (Примечание: при нахождении значения коэффициента теплопередачи  $k$  рекомендуется соблюдать точность полученных значений в расчетах не менее чем до  $10^{-7}$  (0,0000001)):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

2) Плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>

$$q = k \cdot (t_{жс1} - t_{жс2}) \quad [\text{Вт/м}^2] \quad \text{где } t_{жс1} = t_2 \text{ и } t_{жс2} = t_6$$

3) Определим температуру на поверхностях стенки  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$ :

$$t_{c1} = t_{жс1} - q \frac{1}{\alpha_1} \quad [^\circ\text{C}] \quad t_{c2} = t_{жс2} + q \frac{1}{\alpha_2} \quad [^\circ\text{C}]$$

Примечание: при вычислениях толщина стенки (слоя)  $\delta$  должна быть переведена из [мм] в метры [м].

**Задача 14.** Определить плотность теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, через кирпичную стенку толщиной  $\delta_k$ , мм, покрытую слоем штукатурки толщиной  $\delta_{ш}$ , мм. Теплопроводность кирпича  $\lambda_k$ , Вт/(м·К), а штукатурки  $\lambda_{ш}$ , Вт/(м·К). Температура воздуха внутри помещения –  $t_{вн}$ , °С, снаружи –  $t_{нар}$ , °С. Коэффициенты теплоотдачи равны соответственно  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К). Определить также температуру стенки с внутренней стороны  $t_{c1}$ , °С.

Варианты	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
$\delta_k$ мм	260	270	280	290	300	310	320	330	340	250
$\delta_{ш}$ мм	45	55	40	60	35	65	30	25	20	50
$\lambda_k$	0,98	1,03	1,08	1,13	1,18	1,23	1,28	1,33	1,38	0,93
$\lambda_{ш}$	0,090	0,086	0,082	0,078	0,098	0,103	0,108	0,112	0,118	0,093
$t_{вн}$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	18
$t_{нар}$	-27	-29	-32	-35	-38	-40	-22	-20	-18	-25
$\alpha_1$	6	6,5	7	7,5	8,5	9	9,5	10	10,5	8
$\alpha_2$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	17,5

*Решение:*

1) Находим плотность теплового потока (Примечание: при нахождении величины теплового потока  $q$  рекомендуется соблюдать точность полученных значений в расчетах не менее чем до  $10^{-7}$  (0,0000001)):

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_k}{\lambda_k} + \frac{\delta_{шт}}{\lambda_{шт}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad [\text{Вт/м}^2]$$

2) Определим температуру стенки с внутренней стороны:

$$t_{c1} = t_{ж1} - q \frac{1}{\alpha_1} \quad [^\circ\text{C}]$$

**Задача 15.** Определить потерю теплоты с поверхности 1 м трубопровода горячего водоснабжения  $q_l$ , изолированного слоем совелита толщиной  $\delta_{совелит}$ , мм. Внутренний диаметр трубопровода составляет  $d_{вн}$ , мм, толщина стенки трубопровода  $\delta_{ст}$ , мм и коэффициент теплопроводности стенки трубопровода  $\lambda_{ст}$ , Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности совелита  $\lambda_{совелит}$ , Вт/(м·К). Температура воды  $t_{воды}$ ,  $^\circ\text{C}$ , наружная температура  $t_{воздуха}$ ,  $^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы  $\alpha_1$  Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ) и от изолированной трубы к воздуху  $\alpha_2$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot \text{K}$ ).

<b>Варианты</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>0</b>
$d_{вн}$ мм	32	40	50	60	80	90	100	110	120	76
$\delta_{ст}$ мм	2	2,5	2,5	3	3,5	3,5	4	4	4,5	3
$\lambda_{ст}$	51	52	53	54	55	56	57	58	59	50
$t_{воздуха}$	12	8	5	0	-5	-10	-13	-16	-20	15
$t_{воды}$	65	68	72	76	80	83	88	92	96	95
$\alpha_1$	5100	5150	5200	5250	5300	5350	5400	5450	5500	5000
$\alpha_2$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	15
$\delta_{совелит}$ мм	18	20	22	24	26	28	30	32	35	15
$\lambda_{совелит}$	0,096	0,095	0,093	0,092	0,091	0,089	0,087	0,085	0,083	0,0975

*Решение:*

1) Определим диаметры  $d_1 = d_{вн}$ ;  $d_2 = d_1 + 2 \cdot \delta_{ст}$ ;  $d_3 = d_2 + 2 \cdot \delta_{совелит}$

Примечание: при вычислениях диаметры  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  должны быть переведены из [мм] в метры [м].

2) Потери теплоты с поверхности 1 м трубопровода  $q_l$  составят (Примечание: при нахождении величины  $q_l$  рекомендуется соблюдать точность полученных значений в расчетах не менее чем до  $10^{-7}$  (0,0000001)):

$$q_l = \frac{\pi(t_{ж1} - t_{ж2})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_{совелит}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}} \quad [\text{Вт/м}]$$

## II часть. Контрольные вопросы

Выполнение данной части контрольной работы заключается в развернутом реферативном ответе (1–2 стр.) на три вопроса (по одному из каждого блока вопросов). Вопрос (№) в каждом блоке должен быть выбран студентом **по варианту** – последняя цифра в номере зачетной книжки.

### Первый блок:

1. Предмет технической термодинамики. Основные параметры состояния газов.
2. Понятие об идеальном газе и реальном газе. Уравнение состояния идеального газа.
3. Смеси рабочих тел. Способы задания состава смеси.
4. Теплоемкость газов.
5. Понятие о термодинамических процессах. Равновесные и неравновесные процессы.
6. Внутренняя энергия и работа расширения и сжатия рабочего тела.
7. Первый закон термодинамики.
8. Термодинамические процессы идеальных газов.
9. Энтальпия газа.
10. Энтропия газов.  $T-s$  диаграмма.

### Второй блок:

1. Второй закон термодинамики.
2. Цикл Карно и его термодинамическое значение.
3. Эксергия.
4. Водяной пар. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Процесс парообразования.
5. Влажный воздух.  $h-d$  – диаграмма.
6. Компрессоры.
7. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания
8. Циклы паросиловых установок. Цикл Ренкина.
9. Циклы газотурбинных установок.
10. Циклы холодильных машин.

### Третий блок:

1. Теплопроводность. Закон Фурье. Теплопроводность плоской и цилиндрической стенки.
2. Конвективный теплообмен. Закон Ньютона-Рихмана.
3. Тепловое излучение. Лучистый теплообмен. Закон Стефана-Больцмана.
4. Сложный теплообмен и теплопередача. Теплопередача через плоскую и цилиндрическую стенку.
5. Термодинамика потоков. Сопло Лаваля.
6. Дросселирование пара и газа.
7. Теплообменные аппараты. Типы теплообменных аппаратов.
8. Топливо. Элементарный состав и основные характеристики топлива.
9. Теория горения. Токсичность продуктов сгорания топлива.
10. Котельные установки. Тепловой баланс котельного агрегата.

## Рекомендуемая литература

### Основная литература

1. Теплотехника: Учебник для втузов/ Под общ. ред. А.М.Архарова, В.Н.Афанасьева. – М., 2004. – 712 с.
2. В.Н. Луканин., М.Г. Шатров, Г.М. Камфер. Теплотехника – М.: Высшая школа, 2000. – 671 с.
3. Круглов Г.А., Булгакова Р.И., Круглова Е.С. Теплотехника. – СПб.: Лань, 2010. – 208 с.
4. Драганов Б.Х., Кузнецов А.В., Рудобашта С.П. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве. Учебник для вузов по инженерным специальностям сельского хозяйства. М.: Агропромиздат, 1990 г., - 463 с.
5. Теплотехника. /Под общей редакцией Крутова В.И. - М.: Машиностроение, 1986 г., - 432 с.
6. Ерохин В.Г., Маханько М.Г. Сборник задач по основам гидравлики и теплотехники: учебное пособие – М., 2009. – 240 с.
7. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена /Под ред. В.И. Крутова и Г.В. Петражицкого. – СПб.: 2011. – 384 с.
8. Панкратов Г.П. Сборник задач по теплотехнике. – М.: 2009. – 252 с.
9. Синявский Ю.В. Сборник задач по «Теплотехнике». – М.: 2010. – 128 с
10. Андрианова Т.Н., Дзампов Б.В., Зубарев В.Н. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Издательство МЭИ., 2000. – 272 с.

### Дополнительная литература

1. Теплотехника. Учебник для вузов. /Под редакцией Баскакова А.П. 2-е издание, переработанное. М.: Энергоатомиздат., 1991 г., - 224 с.
2. Рудобашта С.П. и др. Тепло- и водоснабжение сельского хозяйства. Под ред. С.П. Рудобашты. М.: Колос. 1997. – 508 с.
3. Тихомиров К.В., Сергеенко Э.С. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция: учебник для вузов. – М., 1991. – 480 с.
4. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. Учебное пособие для вузов. - 4-е изд., перераб., - М.: Энергия, 1980 г., - 288 с.
5. Антухов В.В., Павсте Б.Я. Задачник по процессам тепломассообмена. Учебное пособие для вузов. - М.: Энергоатомиздат, 1986 г., - 144 с.
6. Ильюхин М.С., Сидоренков Ф.Т. Основы теплотехники М.: Агропромиздат, 1987 – 144 с.
7. Захаров А.А. Применение теплоты в сельском хозяйстве. – М.: Агропромиздат, 1986 г., - 287 с.