

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра технологического  
и холодильного оборудования

Термодинамика и теплопередача  
*Методические указания для практических занятий  
студентов, обучающихся по направлению  
21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства»  
Направленности/специализации:  
«Физические процессы нефтегазового производства»  
всех форм обучения*

Мурманск  
2021

**Составители:** Дьяков Алексей Владимирович, старший преподаватель кафедры технологического и холодильного оборудования Мурманского государственного технического университета,

МУ рассмотрены и одобрены кафедрой технологического и холодильного оборудования 22.06.2021 протокол № 12

**Рецензент -** Рецензент – Похольченко Вячеслав Александрович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологического и холодильного оборудования.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Общие требования к решению задач	5
Практическое занятие 1. Параметры состояния термодинамической системы. Уравнение состояния идеальных газов. Смеси газов	5
Практическое занятие 2. Первый закон термодинамики. Теплоемкость, внутренняя энергия, энтальпия и энтропия газов	14
Практическое занятие 3. Термодинамические процессы идеальных газов	23
Практическое занятие 4. Второй закон термодинамики. Термодинамический анализ циклов	30
Практическое занятие 5. Водяной пар. Параметры состояния	37
Практическое занятие 6. Влажный воздух. Процессы охлаждения и сушки	43
Практическое занятие 7. Теплопроводность как один из видов процесса теплопередачи	51
Практическое занятие 8. Конвективный теплообмен при течении жидкости и газа	62
Практическое занятие 9. Расчет теплообменных аппаратов	68
Приложение	73

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания содержат общие требования при решении задач, методические рекомендации и примеры, а так же основные типы задач для самостоятельного решения с целью закрепления изученного материала, подобранные согласно рабочей программе курса.

В методические указания включены задачи по термодинамике и основам теории теплообмена, предназначенные для подготовки студентов, обучающихся по направлению 21.05.05 «Физические процессы горного или нефтегазового производства»

Направленности/специализации:

«Физические процессы нефтегазового производства»»

Для самостоятельной работы студентов и закрепления полученных знаний по каждой теме приводится рекомендуемая литература перечень контрольных вопросов.

В приложении к методическим указаниям представлен справочный материал, необходимый для решения задач.

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ**

1. К решению задач следует приступать только после изучения соответствующего раздела курса.
2. При решении задач следует кратко записывать условия задачи. Все данные величины должны быть переведены в Международную систему единиц (СИ).
3. Решение задачи необходимо сопровождать пояснениями, включающими записи формул в общем виде, единиц измерения подставляемых в формулы величин, ссылку на использованные литературные источники.
4. Вычисления необходимо выполнять в развернутом виде с подстановкой числовых значений каждой величины в общую формулу.
5. Термодинамические циклы в  $v$ - $P$  - и  $s$ - $T$  диаграммах следует изображать в масштабе с указанием направления протекания процессов, а также показывать участки диаграммы, на которых осуществляется подвод или отвод теплоты.
6. В заключение требуется записать окончательные результаты в виде ответа на поставленные в задаче вопросы.

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 1**

### **ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. СМЕСИ ГАЗОВ**

Термодинамическая система и окружающая среда. Теплота и работа как формы передачи энергии. Классификация термодинамических систем. Рабочее тело. Основные параметры состояния. Равновесные и неравновесные термодинамические системы. Общее уравнение состояния. Термодинамический процесс.  $V$ - $P$  – диаграмма и термодинамические процессы в ней. Идеальные газы. Уравнение состояния идеальных газов. Удельная и универсальная газовые постоянные и их физический смысл. Смесии идеальных газов. Свойства,

способы задания, связь между массовыми, объемными и молярными долями. Вычисление параметров состояния смеси.

### **Методические указания**

При изучении данной темы необходимо усвоить терминологию и основные понятия, используемые при рассмотрении процессов взаимодействия термодинамической системы и окружающей среды, взаимного превращения теплоты и работы, при вычислении параметров состояния идеального газа и газовых смесей.

Изучая материалы данной темы, следует обратить внимание на принципиальные отличия идеальных газов от реальных. При этом следует иметь в виду, что общее уравнение состояния справедливо как для идеальных, так и для реальных газов. Однако в виду больших трудностей до сих пор не удалось получить универсального уравнения для реальных газов, которое охватывало бы все области изменения их состояний.

Для закрепления изученного материала рекомендуется ответить на вопросы и решить предложенные задачи. При выполнении расчетов следует иметь в виду, что за нормальные условия в технической термодинамике принимаются следующие:  $P_{\text{н}} = 101326 \text{ Па}$ ,  $T_{\text{н}} = 273,15\text{К}$ .

### **Рекомендуемая литература**

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 6-20).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 10-13).

3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 7-12).

### Контрольные вопросы и задания

1. Что понимается под термодинамической системой? Дайте классификацию термодинамических систем.
2. Назовите основные термические параметры состояния рабочего тела и напишите их размерность.
3. В чем состоит различие между абсолютным давлением, избыточным и атмосферным давлениями?
4. Дайте определение идеального газа.
5. Какие параметры входят в уравнение состояния идеального газа?
6. Объясните физический смысл удельной газовой и универсальной газовой постоянных и напишите их размерность.
7. Напишите уравнения состояния для 1 кг,  $m$  кг, 1 кмоль,  $\mu$  кмоль идеального газа.
8. Дайте определения основных законов для идеальных газов.
9. Что называется газовой смесью?
10. В чем сущность закона Дальтона?
11. Напишите соотношения между массовыми и объемными долями.
12. Как определить среднюю молярную массу и удельную газовую постоянную смеси?

### Примеры решения задач

**Задача 1.1.** Ртутный вакуумметр, присоединенный к сосуду, показывает разрежение  $P = 60$  кПа при температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  ртути в вакуумметре. Давление атмосферы по ртутному барометру  $B = 102,4$  кПа при температуре ртути  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Определить абсолютное давление в сосуде.

**Решение.** Приводим показания ртутных приборов к  $0^\circ\text{C}$  по формуле

$$P_0 = P \cdot (1 - \alpha \cdot t), \quad (1)$$

где  $P$  - показания ртутного прибора при  $t^\circ\text{C}$ , Па;

$\alpha$  - коэффициент расширения ртути,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$t$  - температура ртути в приборе,  $^\circ\text{C}$ .

Подставив числовые значения исходных данных в формулу, получим

$$P_o = 60 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 25) = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,9957 = 59740 \text{ Па};$$

$$B_o = 102,4 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 20) = 102,4 \cdot 10^3 \cdot 0,9966 = 102050 \text{ Па}.$$

Абсолютное давление в сосуде равно разности между атмосферным и вакуумметрическим давлением в сосуде

$$P_{абс} = B_o - P_o, \quad (2)$$

$$P_{абс} = 102050 - 59740 = 42310 \text{ Па} = 42,31 \text{ кПа}$$

**Ответ:**  $P_{абс} = 42,31 \text{ кПа}$ .

**Задача 1.2.** Баллон, емкостью 55 л наполнен углекислым газом  $\text{CO}_2$ . Давление сжатого газа по манометру 15 МПа. Определить температуру сжатого газа, если его объем при нормальных условиях составляет  $7,5 \text{ м}^3$ .

**Решение.** Определяем абсолютное давление в баллоне

$$P_{абс} = P_{изб} + B_n, \quad (3)$$

где  $P_{изб}$  - избыточное давление по манометру, Па;

$B_n$  - атмосферное (барометрическое) давление при нормальных условиях, Па.

$$P_{абс} = 15 \cdot 10^6 + 101325 = 15101325 \text{ Па},$$

т.к. нормальными условиями в термодинамике считаются  $T=273,15 \text{ К}$  и  $P_n = 101325 \text{ Па}$ .

Из уравнений состояния для сжатого газа и для газа при начальных условиях следует

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T$$

$$P_n \cdot V_n = m \cdot R \cdot T_n, \quad (4)$$

откуда

$$P \cdot V / T = P_n \cdot V_n / T_n. \quad (5)$$

Из последнего соотношения находим температуру сжатого газа

$$T = P \cdot V \cdot T_n / (P_n \cdot V_n), \quad (6)$$

где  $V$  - объем сжатого газа (баллона),  $\text{м}^3$ ;

$P_n, T_n$  - давление (Па) и температура (К) газа при нормальных условиях, соответственно.

Подставляя полученные значения в формулу, находим

$$T = 15101325 \cdot 0,055 \cdot 273 / (101325 \cdot 7,5) = 298,4 \text{ К}$$

**Ответ:**  $T = 298,4 \text{ К}$ .

**Задача 1.3.** После пуска ДВС давление сжатого воздуха в пусковом баллоне понизилось от 3,5 до 2,9 МПа. Определить объем израсходованного воздуха при давлении и температуре окружающей среды, соответственно, 100800 Па и  $18^\circ\text{C}$ , если вместимость пускового баллона составляет  $0,2 \text{ м}^3$ , температура воздуха в баллоне до пуска ДВС составляла  $18^\circ\text{C}$ , а после пуска – «плюс»  $10^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Определяем массу воздуха, содержащегося в баллоне, до пуска ДВС:

$$m_1 = P_1 \cdot V / (R \cdot T_1), \quad (7)$$

где  $P_1$  - начальное давление сжатого воздуха в баллоне, Па;

$V$  - объем баллона,  $\text{м}^3$ ;

$R$  - удельная газовая постоянная воздуха, Дж/(кг · К);

$T_1$  - начальная температура воздуха в баллоне, К.

$$m_1 = 3,5 \cdot 10^6 \cdot 0,2 / (287 \cdot 291) = 8,38 \text{ кг.}$$

Определяем массу оставшегося в баллоне воздуха после пуска ДВС

$$m_2 = P_2 \cdot V / (R \cdot T_2), \quad (8)$$

где  $P_2$  - давление оставшегося в баллоне воздуха, Па;

$T_2$  - температура оставшегося в баллоне воздуха, К.

$$m_2 = 2,9 \cdot 10^6 \cdot 0,2 / (287 \cdot 283) = 7,14 \text{ кг.}$$

Масса израсходованного воздуха

$$m = m_1 - m_2 \quad (9)$$

$$m = 8,38 - 7,14 = 1,24 \text{ кг}$$

Находим объем израсходованного воздуха

$$V_0 = m \cdot R \cdot T_0 / P_0, \quad (10)$$

где  $T_0$  - температура окружающей среды, К;

$P_0$  - давление окружающей среды, Па.

$$V_0 = 1,24 \cdot 287 \cdot 291 / (1,008 \cdot 10^5) = 1,028 \text{ м}^3$$

**Ответ:**  $V_0 = 1,028 \text{ м}^3$ .

**Задача 1.4.** Объемные доли компонентов смеси идеальных газов равны 25 %  $\text{CO}_2$  и 75 %  $\text{O}_2$ . Давление смеси составляет 0,085 МПа при температуре 100°C. Найти парциальные давления компонентов, молярную массу смеси, массовые доли компонентов, газовую постоянную смеси, а также плотность смеси при условиях, указанных в задаче.

**Решение.** Парциальные давления компонентов смеси определяем по уравнению

$$P_i = r_i \cdot P_{см}, \quad (11)$$

где  $r_i$  - объемная доля  $i$ -го компонента смеси;

$P_{см}$  - давление смеси, Па.

$$P_{\text{CO}_2} = 0,25 \cdot 0,085 \cdot 10^6 = 21,25 \cdot 10^3 \text{ Па};$$

$$P_{\text{O}_2} = 0,75 \cdot 0,085 \cdot 10^6 = 63,75 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Молярная масса смеси

$$\mu_{см} = \sum_i^n \mu_i \cdot r_i, \quad (12)$$

где  $\mu_i$  - молярная масса  $i$ -го компонента смеси, кг/кмоль;

$$\mu_{см} = \mu_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{O}_2} \cdot r_{\text{O}_2}$$

$$\mu_{см} = 44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75 = 35 \text{ кг/кмоль}$$

Массовые доли компонентов смеси определяем через объемные доли по формуле

$$g_i = \mu_i \cdot r_i / \sum_i^n \mu_i \cdot r_i = \mu_i \cdot r_i / \mu_{см}, \quad (13)$$

$$g_{\text{CO}_2} = 44 \cdot 0,25 / 35 = 0,314;$$

$$g_{\text{O}_2} = 32 \cdot 0,75 / 35 = 0,686.$$

Определяем газовую постоянную смеси

$$R_{см} = R_{\mu} / \mu_{см}, \quad (14)$$

где  $R_{\mu}$  - универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К).

$$R_{см} = 8314 / 35 = 237,5 \text{ Дж / (кг} \cdot \text{К)}.$$

Плотность смеси может быть определена из уравнения состояния:

$$P_{см} \cdot v_{см} = R_{см} \cdot T_{см}$$

Так как  $v_{см} = 1 / \rho_{см}$ , то

$$\rho_{см} = P_{см} / (R_{см} \cdot T_{см}), \quad (15)$$

$$\rho_{см} = 0,085 \cdot 10^6 / (238 \cdot 373) = 0,957 \text{ кг/м}^3$$

**Ответ:**  $P_{CO_2} = 21,25 \text{ кПа}; P_{O_2} = 63,75 \text{ кПа}; \mu_{см} = 35 \text{ кг/кмоль};$

$$g_{CO_2} = 0,314; \quad g_{O_2} = 0,686; \quad R_{см} = 237,5 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$\rho_{см} = 0,957 \text{ кг/м}^3.$$

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 1.5.** Определить абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает 0,25 МПа, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 700 мм рт. ст. при температуре 20 °С.

**Ответ:**  $P_{абс} = 0,343 \text{ МПа}.$

**Задача 1.6.** Определить барометрическое давление при 0 °С в Па, если ртутный барометр при 30 °С показывает 755 мм рт. ст.

**Ответ:**  $P_0 = 10^5 \text{ Па}.$

**Задача 1.7.** Для пуска дизелей используется сжатый воздух. Определить отношение абсолютных давлений в баллоне, если до пуска манометр показывал  $P_{1изб} = 5,4 \text{ МПа}$ , а после пуска  $P_{2изб} = 2,94 \text{ МПа}$ . Давление окружающей среды 742 мм рт. ст. при температуре 293,15 К.

**Ответ:**  $\frac{P_{1абс}}{P_{2абс}} = 1,81.$

**Задача 1.8.** По данным испытаний паровой турбины разрежение в ее конденсаторе составляет 94 % при барометрическом давлении 97 кПа и температуре 0 °С. Каково абсолютное давление в конденсаторе?

**Ответ:**  $P_{абс} = 5,8 \text{ кПа}$ .

**Задача 1.9.** В сосуде находится воздух под разрежением 10 кПа при температуре 0 °С. Ртутный барометр показывает 99725 Па при температуре ртути 20 °С. Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

**Ответ:**  $v = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

**Задача 1.10.** В баллоне емкостью 60 л находится водород при давлении 5 МПа и температуре 30 °С. Определить массу газа в баллоне.

**Ответ:**  $m_{H_2} = 0,24 \text{ кг}$ .

**Задача 1.11.** Масса воздуха, заключенного между крышкой цилиндра и поршнем компрессора, равна 0,5 кг. Диаметр цилиндра 0,5 м, давление и температура воздуха внутри цилиндра 0,35 МПа и 400 К, соответственно. При неизменном давлении движущийся без трения поршень перемещается на 20 см.

Определить начальное расстояние от поршня до крышки цилиндра и температуру в цилиндре после перемещения поршня.

**Ответ:**  $X = 0,84 \text{ м}; T_1 = 495 \text{ К}; T_2 = 305 \text{ К}$ .

**Задача 1.12.** Поршневой компрессор всасывает в минуту 3 м<sup>3</sup> воздуха при температуре 17 °С и барометрическом давлении 100 кПа и нагнетает его в резервуар, объем которого равен 8,5 м<sup>3</sup>. За сколько минут компрессор поднимет давление в резервуаре до 0,7 МПа, если температура в нем будет оставаться постоянной. Начальное давление воздуха в резервуаре составляло 100 кПа при температуре 17 °С.

**Ответ:**  $\tau = 17,04 \text{ мин}$ .

**Задача 1.13.** В трубке манометра (рисунок 1.1), соединяющейся с окружающей средой, имеется столб воды высотой 50 мм. Определить абсолютное давление в баллоне, если разность уровней ртути в манометре составляет 120 мм,

а давление окружающей среды 0,95 атм.

**Ответ:**  $P_{абс} = 111,5 \text{ кПа}$ .

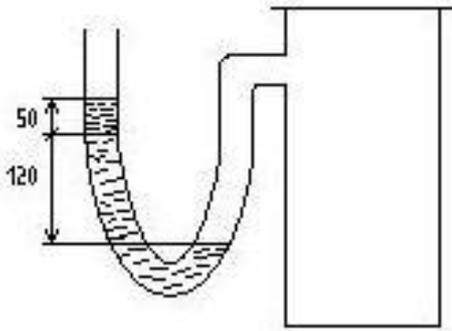


Рисунок 1.1

**Задача 1.14.** Смесь двух объемов водорода и одного объема кислорода называется гремучим газом. Определите газовую постоянную гремучего газа.

**Ответ:**  $R_{см} = 699 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

**Задача 1.15.** Объемный состав сухих продуктов сгорания органического топлива (не содержащих водяных паров) следующий:  $\text{CO}_2 = 12,3 \%$ ;  $\text{O}_2 = 7,2 \%$ ;  $\text{N}_2 = 80,5 \%$ . Найти кажущуюся молярную массу и газовую постоянную смеси, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при давлении 100 кПа и температуре  $800^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\mu = 30,3 \text{ кг}/\text{кмоль}$ ;  $R = 274 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho = 0,34 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

$$v = 2,94 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

**Задача 1.16.** Объемная доля компонентов влажного воздуха: 21 %  $\text{O}_2$ , 78,1 %  $\text{N}_2$ , 0,9 % водяного пара. Определить массовые доли, парциальные давления компонентов воздуха при давлении смеси 0,1 МПа, газовую постоянную воздуха и его плотность при нормальных условиях.

**Ответ:**  $g_{\text{O}_2} = 0,233$ ;  $g_{\text{N}_2} = 0,76$ ;  $g_{\text{H}_2\text{O}} = 0,006$

$$P_{\text{O}_2} = 0,021 \text{ МПа}; P_{\text{N}_2} = 0,0781 \text{ МПа}; P_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0009 \text{ МПа};$$

$$R_{см} = 0,289 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \rho_n = 0,957 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2

### ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ, ЭНТАЛЬПИЯ И ЭНТРОПИЯ ГАЗОВ

Работа и теплота процесса. Внутренняя энергия системы. Сущность первого закона термодинамики и его основные формулировки. Энтальпия.

Аналитические выражения первого закона термодинамики. Теплоемкость. Виды теплоемкостей. Истинная и средняя теплоемкость. Формулы и таблицы для определения значений теплоемкости в термодинамических процессах. Уравнение Майера. Энтальпия и ее физический смысл. Тепловая диаграмма и ее свойства.

#### Методические указания

При изучении данной темы следует обратить внимание на различную природу величин  $du$ ,  $di$ , и  $ds$ , с одной стороны, и  $dq$ ,  $dl$ ,  $dl'$  - с другой, так как внутренняя энергия, энтальпия и энтропия являются функциями состояния, изменения которых определяются начальным и конечным состояниями рабочего тела независимо от совершающегося при этом процесса. В связи с этим  $du$ ,  $di$ , и  $ds$  представляют собой положительные или отрицательные бесконечно малые изменения соответственно удельной внутренней энергии, удельной энтальпии рабочего тела и удельной энтропии и являются полными дифференциалами. Величины  $q$ ,  $l$ ,  $l'$  являются функциями не состояния, а процесса, характер протекания которого определяет их числовые значения. В связи с этим величины  $dq$ ,  $dl$  и  $dl'$  представляют собой соответственно бесконечно малые количества удельной теплоты, удельной работы расширения и удельной располагаемой работы, затраченные или полученные в элементарном процессе изменения состояния рабочего тела, т. е. теплота и работа не являются параметрами состояния рабочего тела и не имеют полных

дифференциалов. Поскольку количество теплоты зависит от характера процесса, то и теплоемкость также зависит от условий протекания процессов.

Успешное освоение данной темы важно, прежде всего, для последующего изучения термодинамических процессов, протекающих в тепловых аппаратах, машинах и установках, понимания сущности процессов при расчете к сравнительной оценке эффективности тепловых агрегатов.

### **Рекомендуемая литература**

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 26-38).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 14-23).

3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 12-20).

### **1. Контрольные вопросы и задания**

1. Дайте определение удельной теплоемкости.
2. Запишите соотношения между массовой, объемной и молярной (молярной) теплоемкостями.
3. В чем отличие понятий "истинная теплоемкость" и "средняя теплоемкость"?
4. Как определить среднюю теплоемкость в интервале температур  $t_1...t_2$ , пользуясь таблицами теплоемкостей?
5. Объясните смысл величин, входящих в уравнение Майера.
6. Сформулируйте первый закон термодинамики и напишите его аналитическое выражение.
7. От каких параметров состояния зависит внутренняя энергия газов?
8. Чем являются теплота и работа - функцией процесса или состояния?

Почему?

9. Дайте определение обратимого и необратимого, равновесного и неравновесного процессов

10. Что такое энтальпия и энтропия? В чем заключается их физический смысл?

11. Как определить приращение энтропии идеального газа в зависимости от основных термических параметров состояния?

12. Как определить работу и теплоту процесса в  $v$ - $P$  - и  $s$ - $T$  -диаграммах?

13. В каком случае теплота, работа, изменение внутренней энергии и энтропии считаются положительными? Отрицательными?

### Примеры решения задач

**Задача 2.1.** Определить среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для азота в пределах от 300 до 600 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

**Решение.** Среднее значение теплоемкости в пределах от  $t_1$  до  $t_2$  определяем по формуле

$$\bar{C}_v = q / (t_2 - t_1), \quad (16)$$

где  $t_1, t_2$  - начальная и конечная температуры соответственно, °С;

$q$  - количество теплоты, сообщаемой единице количества газа (или отнимаемой от него) при изменении температуры газа от  $t_1$  до  $t_2$ .

Количество теплоты, участвующей в процессе при постоянном объеме:

$$q_v = \bar{C}_{v,2} \cdot t_2 - \bar{C}_{v,1} \cdot t_1, \quad (17)$$

где  $\bar{C}_{v,1}, \bar{C}_{v,2}$  - средние значения объемной теплоемкости в пределах изменения температур от 0 до  $t_1$ , °С и от 0 до  $t_2$ , °С, соответственно (приложение, таблица 3).

Тогда

$$\bar{C}_v \Big|_{t_1}^{t_2} = (\bar{C}_{v,2} \cdot t_2 - \bar{C}_{v,1} \cdot t_1) / (t_2 - t_1). \quad (18)$$

Пользуясь таблицей теплоемкости для азота (см. приложение, таблица 3),

получим

$$\bar{C}_{v,2} \Big|_0^{600} = 0,7716 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\bar{C}_{v,1} \Big|_0^{300} = 0,7448 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Поэтому

$$\bar{C}_v \Big|_{300}^{600} = (0,7716 \cdot 600 - 0,7448 \cdot 300)/(600 - 300) = 0,7984 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$\text{Ответ: } \bar{C}_v \Big|_{300}^{600} = 0,7984 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

**Задача 2.2.** Воздух расширяется при постоянном давлении 0,6 МПа, при этом его объем изменяется от 0,4 до 2,0 м<sup>3</sup>. Температура в конце расширения равна 1600°С. Определить, температуру воздуха в начале процесса расширения, подведенное количество теплоты, работу, совершенную в этом процессе, изменение внутренней энергии и энтальпии воздуха.

Зависимость теплоемкости воздуха от температуры принять нелинейной.

**Решение.** Определяем температуру воздуха в начале процесса расширения. В соответствии с законом Гей - Люссака ( $v/T = \text{const}$  при  $P = \text{const}$ ) можно записать

$$T_1 = T_2 \cdot V_1 / V_2, \quad (19)$$

где  $T_1, T_2$  - абсолютная температура воздуха в начале и в конце процесса соответственно, К;

$V_1, V_2$  - начальный и конечный объем воздуха, м<sup>3</sup>.

$$T_1 = 1873 \cdot 0,4 / 2,0 = 374,6 \text{ К.}$$

Массу воздуха, участвующего в процессе, находим из характеристического уравнения состояния для идеальных газов

$$m = P \cdot V_1 / (R \cdot T_1), \quad (20)$$

$$m = 600 \cdot 0,4 / (0,287 \cdot 374,6) = 2,23 \text{ кг}$$

Среднее значение массовой теплоемкости воздуха при постоянном давлении (см. приложение, таблица 2) в заданном диапазоне температур равно

$$\bar{C}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = (\bar{C}_{p,2} \cdot t_2 - \bar{C}_{p,1} \cdot t_1) / (t_2 - t_1)$$

$$\bar{C}_p \Big|_{t_1}^{t_2} = (1,138 \cdot 1600 - 1,0062 \cdot 101,6) / (1600 - 101,6) = 0,86 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

Подведенное количество теплоты в процессе расширения воздуха определяем по формуле

$$Q_p = m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (21)$$

где  $Q_p$  - количество теплоты, подведенное в процессе расширения воздуха, кДж.

$$Q_p = 2,23 \cdot 1,075 \cdot (1873 - 374,6) = 3592,04 \text{ кДж.}$$

Работа, совершенная в процессе расширения

$$L = P \cdot (V_2 - V_1), \quad (22)$$

где  $L$  - работа, совершенная в процессе расширения воздуха, кДж.

$$L = 600 \cdot (2,0 - 0,4) = 960 \text{ кДж.}$$

Средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме

$$\bar{C}_v \Big|_{t_1}^{t_2} = (\bar{C}_{v,2} \cdot t_2 - \bar{C}_{v,1} \cdot t_1) / (t_2 - t_1).$$

$$\bar{C}_v \Big|_{t_1}^{t_2} = (0,8508 \cdot 1600 - 0,7194 \cdot 101,6) / (1600 - 101,6) = 0,86 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = m \cdot \bar{C}_v \cdot (T_2 - T_1), \quad (23)$$

$$\Delta U = 2,23 \cdot 0,86 \cdot (1873 - 374,6) = 2873,6 \text{ кДж.}$$

Изменение энтальпии в рассмотренном процессе

$$\Delta I = Q_p = 3592,04 \text{ кДж}$$

**Ответ:**  $T_1 = 374,6 \text{ К}; \quad Q_p = 3592,04 \text{ кДж}; \quad L = 960 \text{ кДж};$

$$\Delta U = 2873,6 \text{ кДж}; \quad \Delta I = 3592,04 \text{ кДж}.$$

**Задача 2.3.** Определить изменение энтропии 1 кг азота (при постоянных значениях теплоемкостей  $C_p$  и  $C_v$ ) в процессе сжатия, если начальные параметры  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ ,  $P_1 = 0,5 \text{ МПа}$ , а конечные параметры  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ ,  $P_2 = 4,5 \text{ МПа}$ .

**Решение.** Определяем средние значения теплоемкостей  $C_p$  и  $C_v$  в заданном диапазоне температур

$$\overline{C_p} \Big|_{t_1}^{t_2} = (\overline{C_{p,2}} \cdot t_2 - \overline{C_{p,1}} \cdot t_1) / (t_2 - t_1)$$

$$\overline{C_p} \Big|_{t_1}^{t_2} = (1,0567 \cdot 500 - 1,0316 \cdot 100) / (500 - 100) = 1,063 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$\overline{C_v} \Big|_{t_1}^{t_2} = (\overline{C_{v,2}} \cdot t_2 - \overline{C_{v,1}} \cdot t_1) / (t_2 - t_1)$$

$$\overline{C_v} \Big|_{t_1}^{t_2} = (0,7616 \cdot 500 - 0,7365 \cdot 100) / (500 - 100) = 0,7679 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Изменение энтропии определяем по формуле

$$s_2 - s_1 = \overline{C_v} \ln(T_2 / T_1) + R \cdot \ln(v_2 / v_1) \quad (24)$$

или

$$s_2 - s_1 = \overline{C_v} \ln(T_2 / T_1) + R \cdot \ln(v_2 / v_1) \quad (25)$$

Из характеристического уравнения определяем начальный и конечный объем газа

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1$$

$$v_1 = 0,2968 \cdot 373 / 500 = 0,221 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_2 = R \cdot T_2 / P_2$$

$$v_2 = 0,2968 \cdot 773 / 4500 = 0,051 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение энтропии в процессе сжатия азота

$$\Delta S = s_2 - s_1,$$

$$\Delta S = 0,7679 \cdot \ln(773 / 373) + 0,2968 \cdot \ln(0,051 / 0,221) = 0,124 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

или

$$\Delta S = 1,063 \cdot \ln(0,051 / 0,221) + 0,7679 \cdot \ln(4,5 / 0,5) = 0,124 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

**Ответ:**  $\Delta S = 0,124 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

**Задача 2.4.** Определить энтропию 6 кг азота при давлении 0,6 МПа и температуре 400°С. Теплоемкость газа считать постоянной.

**Решение.** Для газов принято считать значение энтропии при нормальных условиях, т. е. при  $P = 101325 \text{ Па}$  и  $T = 273,15 \text{ К}$  (760 мм рт. ст и 0°С), равным нулю. Определение энтропии для любого состояния газа, отсчитанного от нормального состояния, осуществляется по формулам (при постоянной теплоемкости)

$$\begin{aligned} s &= C_v \ln(T/273) + R \cdot \ln(v/v_n); \\ s &= C_p \ln(T/273) - R \cdot \ln(P/P_n); \\ s &= C_v \ln(P/P_n) + C_p \cdot \ln(v/v_n); \\ s &= C_p \ln(v/v_n) + C_v \cdot \ln(P/P_n) \end{aligned} \quad (26)$$

Для двухатомных газов  $\mu \cdot C_p = 29,3 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ , поэтому можно записать

$$C_p = \mu \cdot C_p / \mu_{N_2}, \quad (27)$$

$$C_p = 29,3 / 28,026 = 1,04 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$R_{N_2} = \mu \cdot R / \mu_{N_2}, \quad (28)$$

$$R_{N_2} = 8314,2 / 28,026 = 0,2968 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Определяем значение энтропии при заданных условиях

$$s = m \cdot [ C_p \ln(T/273) - R \cdot \ln(P/P_n) ]$$

$$\begin{aligned} s &= 6 \cdot [ 1,04 \cdot \ln(673 / 273) - 0,2968 \cdot \ln(600/101,325) ] = 6 \cdot (0,9384 - 0,5279) = \\ &= 2,463 \text{ кДж}/\text{К}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $S = 2,463 \text{ кДж} / \text{К}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 2.5.** Определить среднюю массовую теплоемкость  $\text{CO}_2$  при постоянном давлении в пределах от 0 до  $825^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

**Ответ:**  $C_p = 1,09 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ .

**Задача 2.6.** Вычислить среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении и среднюю объемную теплоемкость при постоянном объеме в пределах от 200 до  $800^\circ\text{C}$  для  $\text{CO}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры: а) нелинейной, б) линейной.

**Ответ:** а)  $C_p = 1,13 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_v' = 1,04 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;

б)  $C_p = 1,126 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_v' = 1,037 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot \text{К})$ .

**Задача 2.7.** Определить средние массовые теплоемкости при постоянном давлении и постоянном объеме для воздуха в пределах изменения температуры от  $300$  до  $900^\circ\text{C}$ , считая зависимости теплоемкостей от температуры нелинейными.

**Ответ:**  $C_p = 1,113 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_v = 0,825 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ .

**Задача 2.8.** В сосуде объемом 600 л находится кислород при давлении 0,5 МПа и температуре  $30^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо подвести, чтобы температура кислорода повысилась до  $400^\circ\text{C}$ , считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

**Ответ:**  $Q_v = 998,88 \text{ кДж}$

**Задача 2.9.** Газовая смесь имеет следующий объемный состав:  $\text{CO}_2 = 0,12$ ,  $\text{O}_2 = 0,07$ ,  $\text{N}_2 = 0,75$ ,  $\text{H}_2\text{O} = 0,08$ . Определить среднюю массовую теплоемкость смеси при постоянном давлении, если смесь нагревается от  $100$  до  $300^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $C_p = 1,04 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$

**Задача 2.10.** Определить среднюю мольную, объемную и массовую

теплоемкости в процентах при постоянном давлении в интервале температур от 0 до 1300°С для смеси газов, имеющих следующий состав:  $\text{CO}_2 = 8 \%$ ,  $\text{CO} = 2 \%$ ,  $\text{N}_2 = 85 \%$ ,  $\text{H}_2 = 5 \%$ .

**Ответ:**  $C_{\mu p} = 33,2 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ ;  $C_p = 1,18 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  
 $C_p' = 1,49 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$

**Задача 2.11.** Воздух массой 10 кг расширяется изотермически при начальном давлении 800 кПа и температуре 400 °С до конечного объема 5 м<sup>3</sup>. Определить начальный объем, конечное давление изменение внутренней энергии и энтальпии в процессе расширения.

**Ответ:**  $V_1 = 2,414 \text{ м}^3$ ;  $P_2 = 386,24 \text{ кПа}$ ;  $\Delta I = 0$ ;  $\Delta U = 0$ .

**Задача 2.12.** Определить энтропию 5 кг кислорода при температуре 300°С и давлении 0,5 МПа. Теплоемкость кислорода считать постоянной.

**Ответ:**  $S = 1,46 \text{ кДж}/\text{К}$ .

**Задача 2.13.** Определить количество тепла, полученное водородом в баллоне емкостью 40 л и изменение его температуры, внутренней энергии и энтальпии, если избыточное давление в результате нагревания баллона повысилось с 140,3 бар до 152 бар. Барометрическое давление 743 мм рт. ст., теплоемкость водорода при постоянном давлении 14,05 кДж/(кг · К), начальная температура 290 К.

**Ответ:**  $\Delta T = 25,5 \text{ К}$ ,  $\Delta U = 118,9 \text{ кДж}$ ,  $\Delta I = 168,39 \text{ кДж}$ .

**Задача 2.14.** Определить изменение температуры 1 кг воздуха в процессе расширения, если к воздуху подведено 1200 кДж теплоты, и он совершает работу в процессе расширения, равную 800 кДж. Значение теплоемкости воздуха считать постоянной и равной  $C_v = 0,703 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

**Ответ:**  $\Delta T = 569 \text{ К}$ .

**Задача 2.15.** Под колоколом газгольдера находится 3 кг азота при начальной температуре 293 К и при постоянном давлении 1,32 бар. Найти увеличение объема газа, совершаемую им работу и повышение его температуры в результате сообщения газу 60 кДж тепла за счет солнечного

излучения. Теплоемкость азота при постоянном давлении 1,03 кДж/(кг · К).

**Ответ:**  $\Delta T = 19,4 \text{ K}$ ,  $\Delta V = 0,13 \text{ м}^3$ ,  $L = 17,16 \text{ кДж}$ .

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3

#### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

Классификация термодинамических процессов идеальных газов. Общие задачи изучения термодинамических процессов. Изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный и политропный процессы. Уравнения процессов. Изображение процессов на V- P – и S-T – диаграммах. Соотношения основных параметров процесса. Вычисление количества теплоты, внутренней энергии, энтальпии и энтропии в обратимых процессах.

#### Методические указания

При изучении термодинамических процессов идеальных газов следует иметь в виду, что во всех процессах, протекающих в одном и том же интервале температур, внутренняя энергия идеального газа изменяется на одинаковую величину. Таким образом, площадь под изохорным процессом в S-T- диаграмме численно равна внутренней энергии любого другого термодинамического процесса, протекающего в том же интервале температур. Если температура рабочего тела в процессе возрастает, то внутренняя энергия увеличивается; если температура снижается, то внутренняя энергия уменьшается.

При изучении изобарных процессов необходимо иметь в виду, что площадь под изобарным процессом в S-T- координатах численно равна изменению энтальпии. Если учесть, что изменение энтальпии определяется только изменением температуры, то в любых термодинамических процессах, протекающих в одном и том же интервале температур, изменение энтальпии одинаково. Поэтому площадь под изобарным процессом в S – T- координатах в заданном интервале температур численно равна изменению энтальпии в любом другом термодинамическом процессе, протекающем в этом же интервале

температур. При увеличении температуры рабочего тела изменение энтальпии в процессе будет положительной величиной, при уменьшении температуры - отрицательной.

Изучая материал данной темы, следует обратить особое внимание на исследование политропных процессов. Стремление описать разнообразные термодинамические процессы единой простой математической формулой, справедливой для любого рассматриваемого процесса (изохорного, изотермического, изобарного и адиабатического), привело к понятию политропного процесса. Политропный процесс характеризуется одной и той же долей количества подводимой теплоты, расходуемой на изменение внутренней энергии системы, и является обобщающим по отношению к другим термодинамическим процессам. Из уравнения политропного процесса при определенном значении показателя политропы может быть получено уравнение изохоры ( $n = \pm \infty$ ), изобары ( $n = 0$ ), изотермы ( $n = 1$ ) и адиабаты ( $n = k$ ).

Важность изучения термодинамических процессов идеальных газов объясняется тем, что рабочие тела во многих реальных технических устройствах, в том числе в системах теплогазоснабжения, вентиляции, отопления, кондиционирования воздуха, можно с некоторым допущением считать идеальным газом, получая при этом приемлемую точность расчетов.

### Рекомендуемая литература

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 40-68).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 30-43).

3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар :

Лань, 2012. - 207 с. (с. 25-80).

### Контрольные вопросы и задания

1. Назовите термодинамические процессы. Дайте определение каждого из процессов.
2. Напишите уравнения и укажите связь основных параметров в каждом термодинамическом процессе.
3. Покажите на  $v$ - $P$ - и  $s$ - $T$  - диаграммах характер изменения термодинамических процессов.
4. Напишите формулы для вычисления теплоты, работы, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии для каждого из процессов.
5. Объясните физический смысл отрицательных значений теплоемкости.
6. Как называется процесс, в котором вся подведенная теплота идет на увеличение внутренней энергии?
7. Как называется процесс, в котором работа совершается лишь за счет уменьшения внутренней энергии?
8. В чем заключается обобщающее значение политропного процесса?
9. При каких значениях показателя политропы можно получить уравнения основных термодинамических процессов?
10. Каким образом на  $sT$  - диаграмме по заданной кривой процесса можно определить знаки теплоты и изменения внутренней энергии?
11. Каково взаимное расположение на  $s$  - $T$  - диаграмме изохоры и изобары, на  $v$ - $P$  - диаграмме - изотермы и адиабаты?

### Примеры решения задач

**Задача 3.1.** В поршневом детандере (расширительном цилиндре) установки глубокого охлаждения политропно расширяется воздух от начального давления 25 МПа и температуры 20°C до конечного давления 1,8 МПа. Определить параметры воздуха в конце процесса расширения, удельные значения изменения внутренней энергии и энтальпии, количества теплоты, работу процесса и располагаемую работу, Показатель политропы  $n = 1,25$ .

**Решение.** Определяем параметры воздуха в конце расширения по формуле

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n}, \quad (29)$$

$$T_2 = 298 \cdot (1,8/25)^{(1,25-1)/1,25} = 176 \text{ K}$$

$$v_2 = R \cdot T_2 / P_2$$

$$v_2 = 0,287 \cdot 176 / 1800 = 0,028 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение внутренней энергии и энтальпии определяем по формулам

$$\Delta u = C_v \cdot (T_2 - T_1), \quad (30)$$

$$\Delta u = 0,7175 \cdot (176 - 298) = -87,5 \text{ кДж/кг}$$

$$\Delta i = C_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (31)$$

$$\Delta i = 1,005 \cdot (176 - 298) = -122,6 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты, участвующей в процессе

$$q = C_v \cdot (n - k) \cdot (T_2 - T_1) / (n - 1), \quad (32)$$

$$q = 0,7175 \cdot (1,25 - 1,4) \cdot (176 - 298) / (1,25 - 1) = 52,52 \text{ кДж/кг}$$

Работу процесса определяем по формуле

$$l = R \cdot (T_1 - T_2) / (n - 1), \quad (33)$$

$$l = 0,287 \cdot (298 - 176) / (1,25 - 1) = 140 \text{ кДж/кг}$$

Располагаемая работа

$$l' = n \cdot l, \quad (34)$$

$$l' = 1,25 \cdot 140 = 175 \text{ кДж/кг}$$

**Ответ:**  $T_2 = 176 \text{ K}$ ;  $v_2 = 0,028 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\Delta u = -87,5 \text{ кДж/кг}$ ;

$\Delta i = -122,6 \text{ кДж/кг}$ ;  $q = 52,52 \text{ кДж/кг}$ ;  $l' = 175 \text{ кДж/кг}$ ;  $l = 140 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 3.2.** Воздух массой 1 кг при температуре  $25^\circ\text{C}$  и давлении 0,102 МПа адиабатно сжимается до давления 2 МПа. Определить изменение удельных значений внутренней энергии и энтальпии воздуха, работу изменения

объема и располагаемую работу.

**Решение.** Определяем температуру воздуха в конце сжатия

$$T = T_0 \cdot (P/P_0)^{(k-1)/k},$$

где  $T_0, P_0$  - начальные температура (К) и давление воздуха (МПа) соответственно;

$k = 1,4$  - показатель адиабаты для воздуха.

$$T = 298 \cdot (2,0/0,102)^{(1,4-1)/1,4} = 698\text{К},$$

Работа 1 кг воздуха

$$l = R \cdot (T_0 - T)/(k - 1), \quad (35)$$

$$l = 0,287 \cdot (298 - 698)/(1,4 - 1) = -287\text{кДж/кг}.$$

Располагаемую работу в адиабатном процессе для 1 кг газа определяем по формуле

$$l' = k \cdot l, \quad (36)$$

тогда для рассматриваемого случая

$$l' = 1,4 \cdot (-287) = -401,8\text{кДж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа в адиабатном процессе и работа процесса равны по величине и противоположны по знаку.

$$\Delta u = -l = 287\text{кДж/кг}$$

Изменение энтальпии в адиабатном процессе для 1 кг газа вычисляем

$$\Delta i = 1,005 \cdot (698 - 298) = 402\text{кДж/кг}.$$

**Ответ:**  $\Delta u = 287\text{кДж/кг}$ ;  $\Delta i = 402\text{кДж/кг}$ ;  $l = -287\text{кДж/кг}$ ;

$l' = -401,8\text{кДж/кг}$ .

**Задача 3.3.** Воздух массой 1 кг с начальной температурой 30°C сжимается в одноступенчатом компрессоре от давления 0,12 МПа до давления 0,9 МПа. Сжатие может происходить по изотерме, адиабате и политропе с показателем политропы  $n = 1,2$ .

Определить для каждого из трех процессов сжатия конечную температуру

газа, отведенную от газа теплоту и работу, затрачиваемую на сжатие воздуха.

**Решение.** Определяем начальный удельный объем воздуха из уравнения состояния

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1$$

$$v_1 = 287 \cdot 303 / (0,12 \cdot 10^6) = 0,725 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Так как в изотермическом процессе  $P_1 \cdot v_1 = P_2 \cdot v_2$ , то конечный объем

$$v_2 = P_1 \cdot v_1 / P_2$$

$$v_2 = 0,725 \cdot 0,12 / 0,9 = 0,097 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

В изотермическом процессе  $T_1 = T_2$  работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха

$$l = R \cdot T \cdot \ln(P_1 / P_2), \quad (37)$$

$$l = 287 \cdot 303 \cdot \ln(0,12 / 0,9) = -175,2 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Количество теплоты, отводимой от газа, в изотермическом процессе равно работе, затрачиваемой на сжатие газа. Следовательно,

$$q = -175,2 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Для адиабатного процесса  $q = 0$ , а конечное значение температуры воздуха определяем по формуле

$$T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{(k-1)/k}, \quad (38)$$

где  $k = 1,4$  - показатель адиабаты для воздуха.

Тогда

$$T_2 = 303 \cdot (0,9 / 0,12)^{0,286} = 539 \text{ К}$$

Работа на сжатие в адиабатном процессе

$$l = 0,287 \cdot (303 - 539) / (1,4 - 1) = -169,3 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

Для политропного процесса

$$T_2 / T_1 = (P_2 / P_1)^{(n-1)/n}, \quad (39)$$

откуда

$$T_2 = 303 \cdot (0,9 / 0,12)^{(1,2-1)/1,2} = 426,8 \text{ К}$$

Тогда

$$q = 0,738 \cdot (1,2 - 1,4) \cdot (426,8 - 303) / (1,2 - 1) = -91,36 \text{ кДж/кг}$$

$$l = 0,287 \cdot (303 - 426,8) / (1,2 - 1) = -177,7 \text{ кДж/кг.}$$

**Ответ:** а) для изотермического процесса сжатия воздуха в компрессоре

$$T_2 = T_1 = 303 \text{ К}; \quad q = -175,2 \text{ кДж/кг}; \quad l = -175,2 \text{ кДж/кг};$$

б) для адиабатного процесса

$$T_2 = 539 \text{ К}; \quad q = 0; \quad l = -169,3 \text{ кДж/кг};$$

в) для политропного процесса

$$T_2 = 426,8 \text{ К}; \quad q = -91,36 \text{ кДж/кг}; \quad l = -177,7 \text{ кДж/кг}$$

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 3.4.** Воздух массой 5 кг с начальными параметрами 2 МПа и 400°С расширяется по адиабате так, что его объем увеличивается в 5 раз. Определить конечный объем, конечные давление и температуру, работу изменения объема и изменение внутренней энергии.

$$\text{Ответ: } V_2 = 2,414 \text{ м}^3; \quad P_2 = 0,21 \text{ МПа}; \quad T_2 = 353,3 \text{ К}; \quad L = 1147 \text{ кДж};$$

$$\Delta U = -1147 \text{ кДж.}$$

**Задача 3.5.** Газ при давлении 0,5 МПа и температуре 30 °С нагревается при постоянном объеме до 300°С. Найти конечное давление газа.

$$\text{Ответ: } P_2 = 0,946 \text{ МПа.}$$

**Задача 3.6.** Определить количество теплоты, необходимое для нагревания 2000 м<sup>3</sup> воздуха при постоянном давлении 0,5 МПа от 150 °С до 600 °С. Зависимость теплоемкость от температуры считать нелинейной.

$$\text{Ответ: } Q = 3940 \text{ МДж.}$$

**Задача 3.7.** Воздух объемом 0,2 м<sup>3</sup> с начальной температурой 20°С нагревается в цилиндре компрессора диаметром 0,5 м при постоянном давлении 0,3 МПа до температуры 300°С.

Определить работу расширения, перемещение поршня и количество теплоты, принимая  $C_p = 1,025 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)} = \text{const.}$

**Ответ:**  $L = 57 \text{ кДж}; H = 0,96 \text{ м}; Q = 287 \text{ кДж}.$

**Задача 3.8.** При изотермическом сжатии  $2 \text{ м}^3$  азота ( $\text{N}_2$ ) с начальным давлением  $P_1 = 0,1 \text{ МПа}$  отводится  $350 \text{ кДж}$  теплоты. Найти конечный объем и давление, затраченную работу.

**Ответ:**  $V_2 = 0,345 \text{ м}^3; P_2 = 0,58 \text{ МПа}; L = - 350 \text{ кДж}.$

**Задача 3.9.** Воздух объемом  $5 \text{ м}^3$  с начальной температурой  $25^\circ\text{C}$  сжимается по политропе ( $n = 1,25$ ) от абсолютного давления  $0,05 \text{ МПа}$  до давления  $0,5 \text{ МПа}$ . Найти конечные значения температуры и объема, а также затраченную работу.

**Ответ:**  $T_2 = 472,3 \text{ К}; V_2 = 0,79 \text{ м}^3; L = - 0,58 \text{ МДж}.$

**Задача 3.10.** Воздух в количестве  $0,5 \text{ кг}$  при начальном давлении  $0,5 \text{ МПа}$  и начальной температуре  $30^\circ\text{C}$  расширяется изотермически до пятикратного объема. Определить работу, совершаемую газом, конечное давление и количество теплоты, сообщаемое газу.

**Ответ:**  $P_2 = 0,1 \text{ МПа}, L = Q = 69,9 \text{ кДж}.$

**Задача 3.11.** Сравнить конечные температуру и объем воздуха при сжатии его в поршневом компрессоре от  $1,0 \text{ бар}$  до  $5,0 \text{ бар}$ : а) адиабатно, б) изотермически, в) по политропе, когда тепло отводится в количестве  $103 \text{ кДж}$ . Начальная температура воздуха  $303^\circ\text{K}$ , начальный объем  $1,3 \text{ л}$ . Показатель политропы принять  $1,105$ .

**Ответ:** а)  $T_2 = 479^\circ\text{K}, V_2 = 0,411 \text{ л};$  б)  $T_2 = 303^\circ\text{K}, V_2 = 0,26 \text{ л};$

в)  $T_2 = 353^\circ\text{K}, V_2 = 0,302 \text{ л}.$

**Задача 3.12.** Газовая смесь, имеющая следующий массовый состав:  $\text{CO}_2$  -  $14\%$ ,  $\text{O}_2$  -  $6\%$ ,  $\text{N}_2$  -  $75\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  -  $5\%$ , нагревается при постоянном давлении от начальной температуры  $600^\circ\text{C}$  до конечной температуры  $2000^\circ\text{C}$ .

Определить количество теплоты, подведенной к  $1 \text{ кг}$  газовой смеси. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной.

**Ответ:**  $q = 1840,5 \text{ кДж/кг}.$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4

### ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИКЛОВ

Обратимые и необратимые термодинамические процессы. Основные положения второго закона термодинамики, его сущность и основные формулировки. Термодинамические циклы тепловых машин: прямые и обратные, обратимые и необратимые. Термический КПД. Прямой и обратный циклы Карно и их свойства. Обобщенный (регенеративный) цикл. Максимальная работа. Эксергия. Эксергетический КПД.

#### Методические указания

При изучении этой темы необходимо обратить особое внимание на то, что термический КПД цикла Карно всегда меньше единицы, не зависит от свойств рабочего тела, определяется только температурами горячего и холодного источников и имеет наибольшее значение по сравнению с термическим КПД любых других циклов. Поэтому никакими новыми конструкциями тепловых двигателей или применением новых рабочих тел нельзя в цикле всю подведенную теплоту превратить в полезную работу, для увеличения термического КПД необходимо стремиться к таким процессам, образующим цикл, чтобы средняя температура подвода теплоты была как можно больше, а средняя температура отвода теплоты как можно меньше.

Рассматривая эксергетический метод исследования, следует четко усвоить, что в общем случае «эксергией» называется удельная работоспособность теплоты, или потока рабочего тела, в обратимом термодинамическом процессе изменения состояния системы от начальных параметров ее состояния до постоянных параметров внешней среды. Эксергетический анализ удобен при исследовании сложных технических устройств, в которых используется энергия в различных формах, - работа, теплота, энергия химических превращений и т. д.

## Рекомендуемая литература

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 102-148).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 50-103).

1. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 45-90)

### 2. Контрольные вопросы и задания

1. Какой цикл называется прямым? Обратным?
2. По какому циклу работают холодильные машины?
3. Чем оценивается эффективность прямого и обратного циклов?
4. Почему термический КПД не может быть равен 1?
5. Из каких термодинамических процессов состоят прямой и обратный циклы Карно?
6. От каких параметров зависит термический КПД цикла Карно?
7. В чем сущность второго закона термодинамики? Приведите его основные формулировки.
8. В чем состоит общность различных формулировок второго закона термодинамики?
9. Почему для необратимого цикла термический КПД будет меньше соответствующего КПД обратимого цикла?
10. Как связано изменение энтропии с теплотой и абсолютной температурой?
11. Дайте определение регенеративного цикла?
12. Что называется эксергией?
13. Для чего вводится понятие среднеинтегральной температуры? Изобразите

среднеинтегральную температуру на s-T - диаграмме.

14. Изобразите на v-P- и s-T - диаграммах циклы ДВС и ГТУ с различным подводом теплоты.

### Примеры решения задач

**Задача 4.1.** В тепловой машине, работающей по циклу Карно, подвод теплоты от горячего источника осуществляется при  $T_1 = 1200$  К, а отвод теплоты к холодному источнику - при температуре  $T_2 = 300$  К. Какая доля подводимого количества теплоты расходуется на совершение работы и какая доля отводится холодному источнику?

**Решение.** Термический КПД цикла Карно

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = 1 - q_2 / q_1, \quad (40)$$

$$\eta_t = 1 - T_2 / T_1, \quad (41)$$

где  $q_1, q_2$  - количество подведенной и отведенной в цикле теплоты, соответственно, кДж;

$T_1, T_2$  - температура горячего и холодного источников, соответственно, К.

Приравнявая правые части выражений для термического КПД, находим

$$q_2 / q_1 = T_2 / T_1, \quad (42)$$

$$q_2 / q_1 = 300 / 1200 = 0,25$$

Принимая общее количество подведенной в цикле теплоты за 1 или 100 %, определяем долю теплоты, которая пошла на совершение работы, и долю теплоты, отведенную к холодному источнику:

$$q_2 = 0,25 \cdot q_1; \quad q_u = q_1 - q_2, \quad (43)$$

где  $q_u$  - теплота, которая пошла на совершение работы цикла, кДж.

$$q_u = q_1 - 0,25 \cdot q_1 = 0,75 q_1$$

**Ответ:** холодному источнику отводится  $0,25 \cdot q_1$ ; на совершение работы расходуется  $q_u = 0,75 \cdot q_1$ .

**Задача 4.2.** Воздух массой 1 кг совершает прямой цикл Карно при температуре горячего и холодного источников соответственно 327 и 27°C. Максимальное давление в цикле при этом составляет 2,0 МПа, а минимальное - 0,12 МПа.

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, работу цикла, термический КПД цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.

**Решение.** Цикл Карно состоит из двух изотермических (1-2 и 3-4) и двух адиабатных (2-3 и 4-1) процессов (рисунок 4.1).

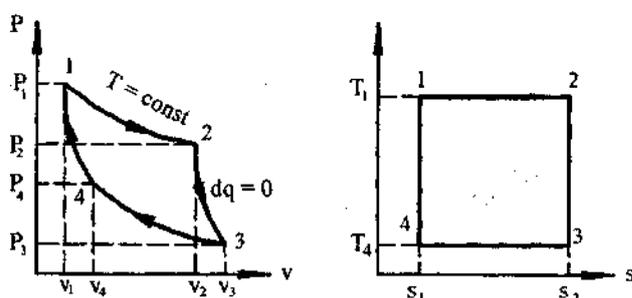


Рисунок 4.1 - Диаграммы цикла Карно в  $v$ - $P$ - и  $s$ - $T$ - координатах

Термический КПД цикла Карно определяем при известных температурах горячего и холодного источников по формуле (41)

$$\eta_t = 1 - 300/600 = 0,5 = 50\%.$$

Удельный объем воздуха в точке 1 находим из уравнения состояния

$$v_1 = 287 \cdot 600 / (2 \cdot 10^6) = 0,0861 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Так как процесс 2-3 - адиабатный, то из уравнения адиабаты

$$P_2 / P_3 = (T_2 / T_3)^{k/(k-1)}$$

находим значение давления в точке 2 процесса:

$$P_2 = 0,12 \cdot (600/300)^{1,4/(1,4-1)} = 1,358 \text{ МПа}$$

Из уравнения адиабаты и с учетом того, что  $T_1 = T_2$ , а  $T_4 = T_3$ , находим значение давления в точке 4 процесса

$$P_4 = P_1 / (T_1 / T_4)^{k/(k-1)}$$

$$P_4 = 2 / (600/300)^{1,4/(1,4-1)} = 0,177 \text{ МПа}$$

Из уравнения состояния при известных значениях давления и темпе-

ратуры определяем значение удельного объема воздуха в каждой точке цикла

$$v_2 = R \cdot T_2 / P_2$$

$$v_2 = 287 \cdot 600 / (1358 \cdot 10^3) = 0,127 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_3 = R \cdot T_3 / P_3$$

$$v_3 = 287 \cdot 300 / (0,12 \cdot 10^6) = 0,7175 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$v_4 = R \cdot T_3 / P_4$$

$$v_4 = 287 \cdot 300 / (0,177 \cdot 10^6) = 0,486 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Количество подведенной и отведенной теплоты для изотермического процесса определяем по формулам

$$q_1 = l_1 = R \cdot T_1 \cdot \ln(v_2/v_1), \quad (44)$$

$$q_1 = l_1 = 0,287 \cdot 600 \cdot \ln(0,127/0,0861) = 66,93 \text{ кДж}$$

$$q_2 = l_2 = R \cdot T_2 \cdot \ln(v_4/v_3), \quad (45)$$

$$q_2 = l_2 = 0,287 \cdot 300 \cdot \ln(0,486/0,7175) = -33,54 \text{ кДж}$$

Далее определяем удельную работу цикла

$$l_u = q_1 - q_2, \quad (46)$$

$$l_u = 66,93 - 33,54 = 33,39 \text{ кДж/кг}.$$

Правильность определения количества подведенной и отведенной теплоты можно проверить, определив термический КПД цикла не через температуру горячего и холодного источников, а через количество теплоты, участвующей в процессе (по формуле 40)

$$\eta_t = 1 - 33,54/66,93 = 0,501 = 50\%.$$

**Ответ:**  $\eta_t = 50\%$ ;  $v_1 = 0,0861 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2 = 0,127 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_3 = 0,7175 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$v_4 = 0,486 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $P_2 = 1,358 \text{ МПа}$ ;  $P_4 = 0,177 \text{ МПа}$ ;  $q_1 = 66,93 \text{ кДж/кг}$ ;

$q_2 = -33,54 \text{ кДж/кг}$ ;  $l_u = 33,39 \text{ кДж/кг}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 4.3.** 1 кг воздуха совершает цикл Карно между температурами 250 и 30 °С, наивысшее давление при этом составляет 1 МПа, наинизшее - 0,12 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках, работу, термический КПД цикла и количества подведенной и отведенной теплоты.

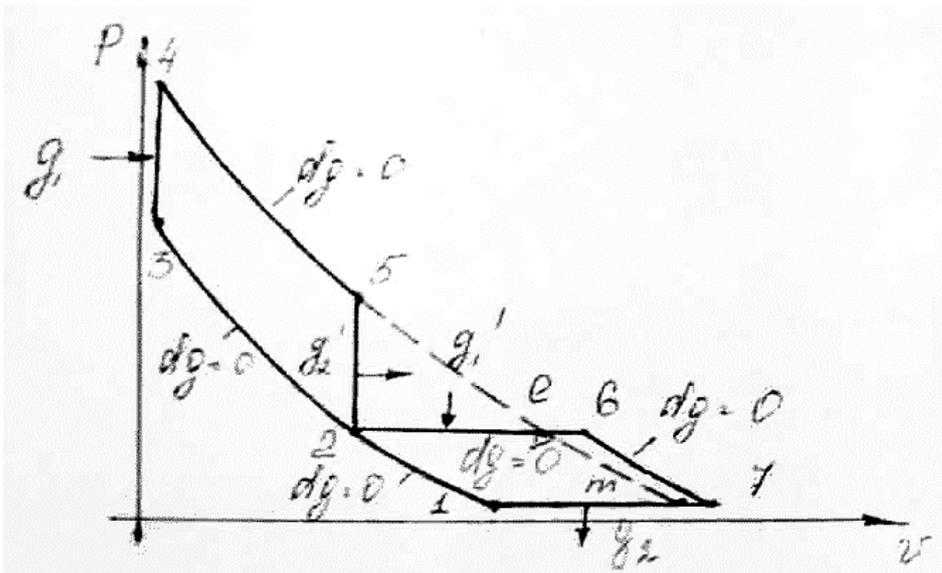
**Ответ:**  $v_1=0,150 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2=0,185 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_3=0,725 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_4=0,58 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  
 $p_2=0,81 \text{ МПа}$ ;  $p_4=0,15 \text{ МПа}$ ;  $\eta_t=0,42$ ;  $q_1=31,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $q_2=19,4 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $l=12,1 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 4.4.** В цикле 1-2-3-4-5-2-6-7-1 (рисунок 4.2) подведенное тепло  $q_2'$  в процессе 5-2 целиком вводится в процессе 2-6, причем  $q_2' = q_1'$ . Определить параметры всех точек цикла, КПД этого цикла по сравнению с циклом 1-2-3-4-5- $\ell$ -m-1, если рабочим телом является 1 кг сухого воздуха,  $p_1=0,98 \text{ бар}$ ,  $t_1=20 \text{ °С}$ ,

$$\pi = \frac{P_2}{P_1} = 3 \quad (\text{степень сжатия}), \quad \varepsilon = \frac{v_2}{v_3} = \frac{v_5}{v_4} = 10 \quad (\text{степень}$$

адиабатного сжатия),  $\lambda = \frac{P_4}{P_3} = 2$  (степень повышения давления при

подводе тепла по изохоре). Теплоемкости принять постоянными:  $C_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $C_v = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .



## Рисунок 4.2

**Ответ:**  $v_1=0,858 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2=0,391 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_3= 0,0391 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_4= 0,0391 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  
 $v_5= 0,391 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_6= 0,666 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_7= 1,459 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $v_m= 1,40 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $p_2= 0,294 \text{ МПа}$ ;  
 $p_3=7,385 \text{ МПа}$ ;  $p_4=14,770 \text{ МПа}$ ;  $p_5=0,588 \text{ МПа}$ ;  $p_6=0,294 \text{ МПа}$ ;  
 $p_7=0,098 \text{ МПа}$ ;  $p_m= 0,098 \text{ МПа}$ ;  $T_1 = 293 \text{ К}$ ;  $T_2 = 401 \text{ К}$ ;  $T_3 = 1006,1 \text{ К}$ ;  
 $T_4 = 2012,2 \text{ К}$ ;  $T_5 = 801 \text{ К}$ ;  $T_6 = 683,6 \text{ К}$ ;  $T_7 = 499,42 \text{ К}$ ;  $T_m= 478,05 \text{ К}$ ;  
 $\Delta \eta_t = 3,2\%$ .

**Задача 4.5.** При совершении цикла в тепловом двигателе к газу подведено 150 кДж теплоты. Термический КПД цикла равен 0,52. Определить работу газа в цикле.

**Ответ:**  $L_{\text{ц}} = 78 \text{ кДж}$ .

**Задача 4.6.** Газ в круговом процессе получает, 160 кДж теплоты и совершает при этом работу, равную 68 кДж. Определить термический КПД процесса.

**Ответ:**  $\eta_t = 0,425$ .

**Задача 4.7.** Идеальный двигатель работает по циклу Карно в пределах температур 300 К и 873 К, при этом воздух массой 1 кг изотермически расширяется в 5 раз.

Определить количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и термический КПД цикла.

**Ответ:**  $q_1 = 403,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $q_2 = 138,6 \text{ кДж/кг}$ ;  $l_{\text{ц}} = 378,6 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $\eta_t = 0,656$ .

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5

### ВОДЯНОЙ ПАР. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

Свойства реальных газов. Коэффициент сжимаемости. Уравнение Ван – дер - Ваальса и его анализ. Диаграмма Эндрюса. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Тройная и критическая точки.

Водяной пар. Процессы парообразования и конденсации. Диаграммы воды и водяного пара в  $v$ - $P$ - и  $s$ - $T$ - координатах. Пограничные кривые. Степень сухости и влажности. Определение параметров состояния воды и водяного пара. Диаграмма Молье. Таблицы водяного пара и их применение для практических расчетов.

### **Методические указания**

Приступая к изучению этой темы, необходимо уяснить, что расчетные формулы, применяющиеся при изучении идеальных газов, в данном случае, как правило, не применимы, и только при очень низких давлениях и высоких температурах реальные газы по своим свойствам приближаются к идеальным.

При рассмотрении отдельных уравнений реального газа, например, уравнения Ван – дер – Ваальса, следует ясно представлять, на каких физических принципах строятся эти уравнения, и как из них получаются уравнения состояния идеальных газов.

Изучая диаграммы воды и водяного пара в  $v$ - $P$ ,  $s$ - $T$  и  $s$ - $i$  координатах, необходимо разобраться в возможностях применения той или иной диаграммы для практических расчетов параметров состояния воды, влажного насыщенного, сухого насыщенного и перегретого пара.

### **Рекомендуемая литература**

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 150-168).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 104-132).

3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 102-130)

4. Комаров Г.А. Техническая термодинамика: Учеб. пособие. - Мурманск: МГАРФ, 1994.-141 С. (с. 71-81).

### Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определения процессов кипения, испарения, конденсации и парообразования.
2. Какой пар называется сухим насыщенным? Влажным насыщенным? Перегретым?
3. Дайте определения степени сухости и степени влажности.
4. Что такое теплота парообразования?
5. Как изменяется теплота парообразования при изменении давления?
6. Какими параметрами можно охарактеризовать состояние влажного, сухого и перегретого пара?
7. Покажите на  $v$ - $P$ - и  $s$ - $T$  - диаграммах водяного пара характерные области и линии фазовых переходов. Как определить с использованием диаграмм количество теплоты, затрачиваемой на получение 1 кг пара?
8. Напишите формулы для вычисления удельного объема, энтропии, энтальпии, и внутренней энергии влажного насыщенного водяного пара.
9. В чем назначение таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара? Каково их использование?
10. Как используются  $s$ - $T$ - и  $s$ - $i$  - диаграммы водяного пара для определения его основных параметров?

### Примеры решения задач

**Задача 5.1.** Определить удельный объем влажного насыщенного пара при давлении 2,4 МПа и степени сухости 0,8.

**Решение.** По таблице 7 приложения при  $P = 2,4$  МПа находим значения

удельных объемов воды  $v'$  и сухого насыщенного пара  $v''$

$$v' = 0,0011932 \text{ м}^3/\text{кг}; v'' = 0,08324 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельный объем влажного насыщенного пара определяем из уравнения

$$v_x = v'' \cdot x + (1 - x) \cdot v', \quad (47)$$

где  $x$  - степень сухости влажного пара.

Тогда

$$v_x = 0,08324 \cdot 0,8 + (1 - 0,8) \cdot 0,0011932 = 0,0668 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

**Ответ:**  $v_x = 0,0668 \text{ м}^3/\text{кг}$  при  $P = 2,4 \text{ МПа}$  и  $x = 0,8$ .

**Задача 5.2.** Состояние водяного пара характеризуется влажностью 25 % и давлением 9 МПа. Найти удельный объем, внутреннюю энергию, энтропию и энтальпию пара.

**Решение.** При  $P = 9 \text{ МПа}$  по таблице 7 приложения находим значения основных параметров состояния воды и сухого насыщенного пара:

для воды -  $v' = 0,0014174 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $i' = 1364,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $s' = 3,287 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

для сухого насыщенного пара -  $v'' = 0,02048 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $s'' = 5,678 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Удельный объем водяного пара при заданных условиях находим из уравнения (47)

$$v_x = 0,02048 \cdot 0,75 + (1 - 0,75) \cdot 0,0014174 = 0,0157 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для вычисления энтальпии водяного пара необходимо по таблице 7 приложения найти удельную теплоту парообразования при заданном давлении

$$r = 1379,3 \text{ кДж/кг}$$

Тогда

$$i_x = i' + r \cdot x, \quad (48)$$

$$i_x = 1364,2 + 1379,3 \cdot 0,75 = 2398,7 \text{ кДж/кг}$$

Далее определяем значения удельной энтропии и удельной внутренней энергии водяного пара при заданных условиях

$$s_x = s'' \cdot x + (1 - x) \cdot s', \quad (49)$$

$$s_x = 5,678 \cdot 0,75 + 0,25 \cdot 3,287 = 5,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

$$u_x = i_x - P \cdot v_x, \quad (50)$$

$$u_x = 2398,7 - 9 \cdot 10^3 \cdot 0,9157 = 2257,4 \text{ кДж/кг}$$

**Ответ:**  $v_x = 0,0157 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $u_x = 2257,4 \text{ кДж/кг}$ ;  $s_x = 5,08 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ;  
 $i_x = 2398,7 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 5.3.** Найти количество теплоты, затраченной на получение 1 кг пара при давлении 2,0 МПа и степени сухости 0,9, если температура питательной воды равна 20°C.

**Решение.** Определяем количество теплоты, необходимой для на-гревания питательной воды от 20°C до температуры кипения по формуле

$$q_1 = i' - i_{20}, \quad (51)$$

где  $q_1$  - количество теплоты, необходимой для нагревания питательной воды от 20°C до температуры кипения, кДж/кг;

$i'$  - значение энтальпии воды в состоянии кипения, кДж/кг;

$i_{20}$  - значение энтальпии питательной воды при 20°C, кДж/кг.

По таблице 6 и 7 приложения при заданной температуре и давлении находим:  $i_{20} = 83,9 \text{ кДж/кг}$ ;  $i' = 908,6 \text{ кДж/кг}$ .

Тогда

$$q_1 = 908,6 - 83,9 = 824,7 \text{ кДж/кг}$$

Количество теплоты, затраченной на получение пара от состояния кипящей воды, равно разности энтальпий пара и кипящей воды

$$q_2 = i_x - i, \quad (52)$$

Так как  $i_x = i' + r \cdot x$ , то

$$q_2 = i' + r \cdot x - i' = r \cdot x,$$

где  $r$  - удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Из таблицы 7 приложения следует, что при  $P = 2,0 \text{ МПа}$  удельная теплота парообразования равна  $r = 1890,7 \text{ кДж/кг}$ , тогда

$$q_2 = 1890,7 \cdot 0,9 = 1701,63 \text{ кДж/кг}$$

Общее количество теплоты, затраченной на получение 1 кг пара при

заданных условиях

$$q = q_1 + q_2, \quad (53)$$

$$q = 1701,63 + 824,7 = 2526,33 \text{ кДж/кг}$$

**Ответ:**  $q = 2526,33 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 5.4.** Определить, пользуясь  $s - i$  - диаграммой, энтропию, энтальпию и удельный объем водяного пара при давлении 0,01 МПа и степени сухости 0,8.

**Решение.** На  $s - i$  - диаграмме водяного пара находим точку  $A$  пересечения изобары  $P = 0,01 \text{ МПа}$  и кривой постоянной степени сухости  $x = 0,8$  (рисунке 5.1).

$i$ , кДж/кг

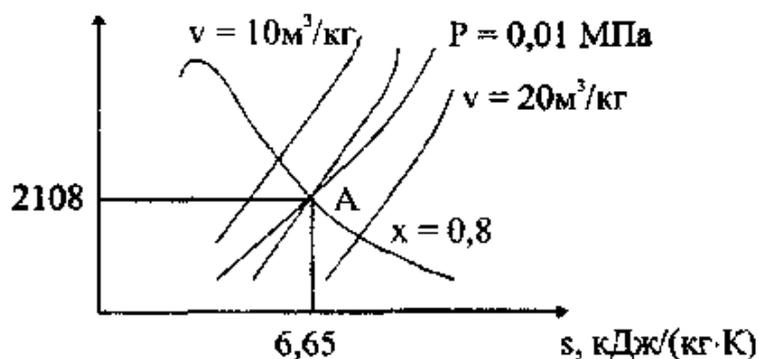


Рисунок 5.1

Опуская перпендикуляр из точки пересечения изобары  $P = 0,01 \text{ МПа}$  и кривой  $x = 0,8$  на оси абсцисс и ординат, находим значения энтропии и энтальпии водяного пара. Пунктирная кривая, проходящая через указанную точку, показывает значение удельного объема водяного пара при заданных условиях.

**Ответ:**  $i_x = 2108 \text{ кДж/кг}$ ;  $s_x = 6,65 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$ ;  $v_x = 0,013 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 5.5.** Определить параметры влажного насыщенного водяного пара при давлении 20 МПа и степень сухости  $x = 0,9$ .

**Ответ:**  $v_x = 0,08977 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $\rho_x = 11,16 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $i_x = 2610,2 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;

$s_x = 5,949 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

**Задача 5.6.** Определить состояния пара, если дано:

1)  $P = 1,0 \text{ МПа}$ ,  $v = 0,17 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,

2)  $P = 1,2 \text{ МПа}$ ,  $t = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:** 1) влажный пар,  $x = 0,875$ ; 2) перегретый пар.

**Задача 5.7.** Определить массу и полную энтальпию  $0,5 \text{ м}^3$  влажного пара со степенью влажности 10 % и давлением 1,0 МПа.

**Ответ:**  $m = 2,9 \text{ кг}$ ,  $J = 7520 \text{ кДж}$ .

**Задача 5.8.** Определить расход количества теплоты в пароперегревателе на 1 кг пара, если параметры на входе  $p_1 = 8,0 \text{ МПа}$  и  $x_1 = 0,95$ , при выходе –  $p_2 = 8,0 \text{ МПа}$  и  $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

**Ответ:**  $q = 712,8 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

**Задача 5.9.** Задано состояние пара: давление 2 МПа, температура  $340 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить, пользуясь  $d - i$  диаграммой, значение удельной энтропии, температуры насыщения пара и величину перегрева пара.

**Ответ:**  $s = 3110 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ,  $t_{\text{нас}} = 487 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_{\text{пер}} = 126 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 5.10.** Состояние водяного пара характеризуется влажностью 5 % и давлением 5 МПа. Найти удельный объем, внутреннюю энергию и энтропию пара.

**Ответ:**  $v_x = 0,0375 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $u_x = 2525 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $s_x = 5,82 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

**Задача 5.11.** Найти количество теплоты, затраченной на получение 1 кг пара при давлении 1,6 МПа и степени сухости 80 %, если начальная температура воды  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $q = 2154 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

**Задача 5.12.** При давлении 0,8 МПа вода нагрета до  $140 \text{ }^\circ\text{C}$ . На сколько градусов нужно нагреть воду, чтобы началось кипение?

**Ответ:**  $\Delta T = 30,41 \text{ К}$ .

**Задача 5.13.** Ртутный термометр парового котла показывает давление 0,17 МПа. Барометрическое давление равно 0,1 МПа. Считая пар сухим насыщенным,

найти его температуру и удельный объем.

**Ответ:**  $T = 403 \text{ K}$ ;  $v'' = 0,6684 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6**

### **ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ. ПРОЦЕССЫ ОХЛАЖДЕНИЯ И СУШКИ**

Влажный воздух как рабочее тело. Абсолютная и относительная влажность. Влажный ненасыщенный и насыщенный воздух. Влагосодержание, точка росы. Основные параметры состояния влажного воздуха. Психрометр. Гигрометр. Температура сухого и мокрого термометров. Диаграмма Рамзина. Определение параметров влажного воздуха.

]

#### **Методические указания**

Рассматривая изменение параметров состояния влажного воздуха в  $d-i$  – диаграмме, следует ясно представлять, почему процессы нагревания и охлаждения влажного воздуха протекают при постоянном влагосодержании, а процессы сушки в идеальной сушильной установке - при неизменной энтальпии.

#### **Рекомендуемая литература**

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 169-188).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 114-132).

3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 129-145)

### Контрольные вопросы и задания.

1. Дайте определение влажного воздуха.
2. Что называется влажным насыщенным и ненасыщенным воздухом?
3. Назовите особенности влажного воздуха как рабочего тела.
4. Дайте определение абсолютной и относительной влажности воздуха. Какова их размерность?
5. Напишите закон Дальтона для влажного воздуха.
6. Что такое влагосодержание воздуха? В каких пределах оно может изменяться?
7. Как определить плотность и энтальпию влажного воздуха?
8. Что называется температурой точки росы?
9. Опишите диаграмму Рамзина ( $d-i$  - диаграмму влажного воздуха).
10. Покажите на  $d-i$  - диаграмме изображение основных процессов влажного воздуха.
11. Почему на  $d-i$  - диаграмме процесс сушки в идеальной сушильной установке протекает при неизменной энтальпии?
12. Как определить состояние влажного воздуха с помощью  $d-i$  диаграммы, если известны показания сухого и мокрого термометров психрометра?

### Примеры решения задач

**Задача 6.1.** Температура влажного воздуха равна  $25^{\circ}\text{C}$ , а температура точки росы –  $20^{\circ}\text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха  $\varphi$ , энтальпию  $i$ , абсолютную влажность  $\rho_e$ , влагосодержание  $d$  и парциальное давление  $P_n$  с использованием  $d-i$  - диаграммы.

**Решение.** На  $d-i$  - диаграмме (см. рисунок 6.1) находим изотермы  $20$  и  $25^{\circ}\text{C}$ . Температура точки росы определяется на пересечении изотермы  $20^{\circ}\text{C}$  с линией насыщения  $\varphi = 100\%$ . Из этой точки проводим вертикальную прямую до пересечения с изотермой  $25^{\circ}\text{C}$ , полученная точка пересечения определяет

состояние влажного воздуха.

Линия постоянной относительной влажности, проходящая через полученную точку с температурой  $25^{\circ}\text{C}$ , дает значение относительной влажности  $\varphi = 75\%$ .

Вертикальная прямая, проведенная через полученную точку с температурой  $25^{\circ}\text{C}$  до пересечения с осью влагосодержания, дает  $d = 15$  г/кг.

Линия, проведенная из полученной точки с температурой  $25^{\circ}\text{C}$  параллельно линиям постоянных энтальпий до пересечения с осью  $i$ , определяет энтальпию влажного воздуха,  $i = 63$  кДж/кг.

Вертикальная прямая, проведенная до пересечения с линией парциального давления пара, определяет  $P_n = 2,2$  кПа.

**Ответ:**  $\varphi = 0,75$  (75 %);  $d = 0,015$  кг/кг;  $i = 63$  кДж/кг;  $P_n = 2,2$  кПа.

**Задача 6.2.** Воздух в калорифере с начальными параметрами  $t_1 = 30^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi = 80\%$  охлаждается до температуры  $20^{\circ}\text{C}$ . Определить конечное состояние влажного воздуха.

**Решение.** На  $d$ - $i$  - диаграмме определяем параметры начального состояния влажного воздуха. При пересечении изотермы  $t_1 = 30^{\circ}\text{C}$  и линии  $\varphi = 80\%$  получаем  $d_1 = 22$  г/кг;  $i_1 = 86$  кДж/кг;  $P_{n1} = 3,2$  кПа.

Из точки 1 (см. рисунок 6.2) проводим вертикальную линию до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$  (процессы нагревания и охлаждения протекают при постоянном влагосодержании). Далее опускаемся по кривой насыщения до пересечения с изотермой  $t_2 = 20^{\circ}\text{C}$ . В точке 2 на  $d$ - $i$  - диаграмме находим:  $d_2 = 15$  г/кг;  $\varphi_2 = 100\%$ ;  $i_2 = 58$  кДж/кг.

Изменение влагосодержания воздуха в процессе его охлаждения составит

$$\Delta d = d_1 - d_2, \quad (54)$$

$$\Delta d = 22 - 15 = 7 \text{ г/кг}.$$

Парциальное давление определяется в точке пересечения вертикальной

линии ( $t_2 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_2 = 100\%$ ) и линии парциального давления пара  $P_n = 2,2$  кПа.

**Ответ:**  $\varphi_2 = 100\%$ ;  $d_2 = 0,015$  кг/кг;  $i_2 = 58$  кДж/кг;  $\Delta d = 0,007$  кг/кг;

$P_{n2} = 2,2$  кПа.

**Задача 6.3.** Состояние влажного воздуха характеризуется следующими параметрами:  $t = 70^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 10\%$ . Определить истинную температуру мокрого термометра и температуру точки росы.

**Решение.** На d-i - диаграмме на пересечении изотермы  $t = 70^\circ\text{C} = \text{const}$  и кривой  $\varphi = 10\% = \text{const}$  находим точку 1 (рисунок 6.4).

Истинная температура мокрого термометра - есть температура адиабатного насыщения воздуха, а этот процесс характеризуется постоянством температуры испаряющейся жидкости ( $t_m = \text{const}$ ), поэтому из точки 1 проводим прямую, параллельную линии  $t_m = \text{const}$ , до пересечения с линией  $\varphi = 100\%$  (точка 2). Эта точка и определяет температуру мокрого термометра, равную  $34,8^\circ\text{C}$ .

Для получения температуры точки росы влажный воздух необходимо охладить при постоянном давлении до состояния полного насыщения. Так как процесс охлаждения протекает при постоянном влагосодержании, то точка росы получается на пересечении вертикали, проведенной из точки 1, и кривой  $\varphi = 100\%$ . Изотерма, проходящая через эту точку, и дает температуру точки росы  $t_p = 25^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $t_m = 34,8^\circ\text{C}$ ;  $t_p = 25^\circ\text{C}$ .

**Задача 6.4.** В процессе сушки воздух с начальными параметрами  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $\varphi_1 = 50\%$  направляется в калорифер, где подогревается до  $95^\circ\text{C}$ . Из калорифера воздух поступает в сушилку, откуда выходит при температуре  $35^\circ\text{C}$ . Определить конечное влагосодержание, расход воздуха и теплоты на 1 кг испаренной влаги.

**Решение.** На d-i - диаграмме находим точку с начальными параметрами воздуха на пересечении линий  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $\varphi_1 = 50\%$ , определяем

влажностное содержание  $d_1 = 7,4$  г/кг и энтальпию  $i_1 = 38$  кДж/кг.

Так как процессы нагревания и охлаждения протекают при постоянном влагосодержании, то, проведя линию  $d = const$ , находим точку пересечения изотермы  $t_2 = 95^\circ\text{C}$  и  $d_1 = 7,4$  г/кг, которой характеризуется состояние воздуха после выхода его из калорифера  $d_2 = d_1 = 7,4$  г/кг;  $i_2 = 118$  кДж/кг.

Из точки 2 (рисунок 6.3) проводим линию  $i = const$  (процесс сушки протекает при постоянной энтальпии) до пересечения с изотермой  $t_3 = 35^\circ\text{C}$ , где находим точку 3, которой характеризуется состояние воздуха на выходе из сушилки  $d_3 = 30,8$  г/кг;  $i_3 = 118$  кДж/кг.

Таким образом, на 1 кг сухого воздуха изменение влагосодержания составляет

$$\Delta d = d_3 - d_1, \quad (55)$$

$$\Delta d = 30,8 - 7,4 = 23,4 \text{ г/кг}.$$

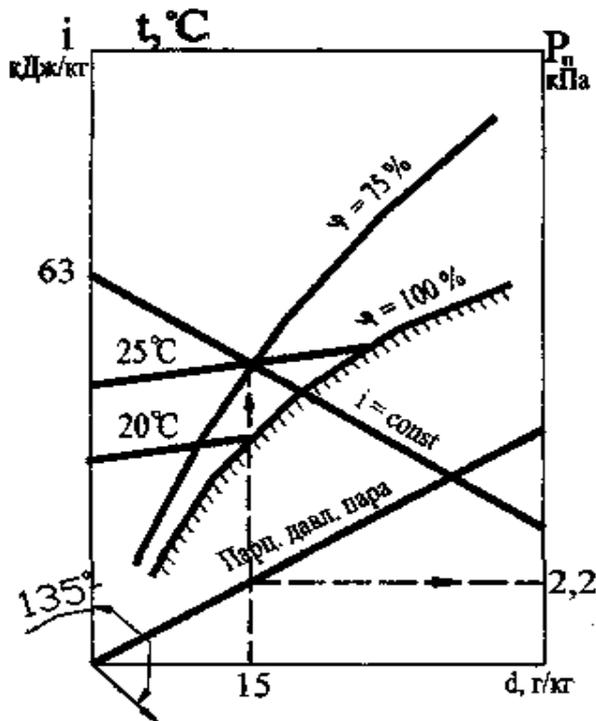


Рисунок 6.1

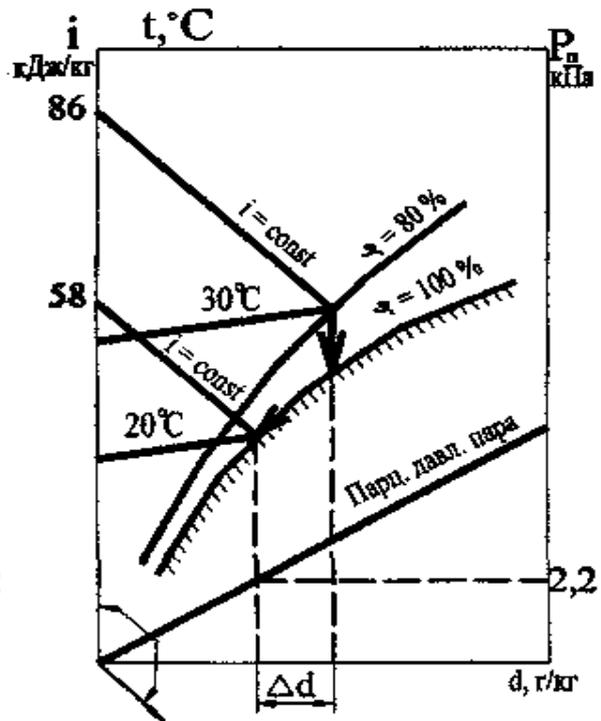


Рисунок 6.2

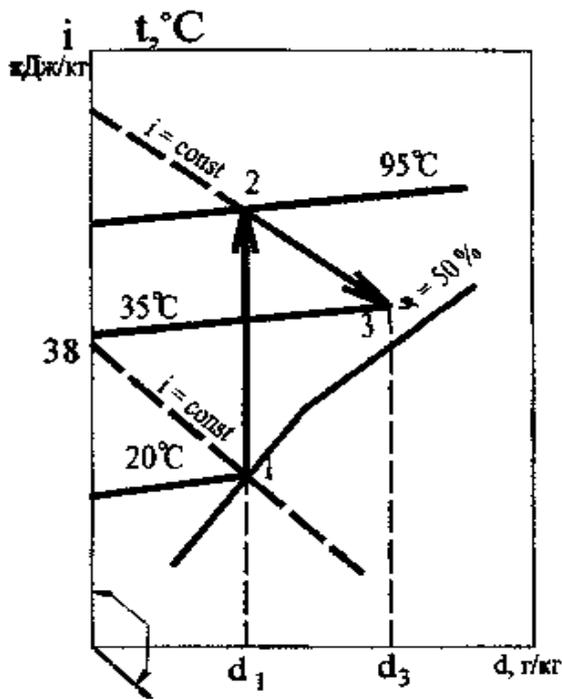


Рисунок 6.3

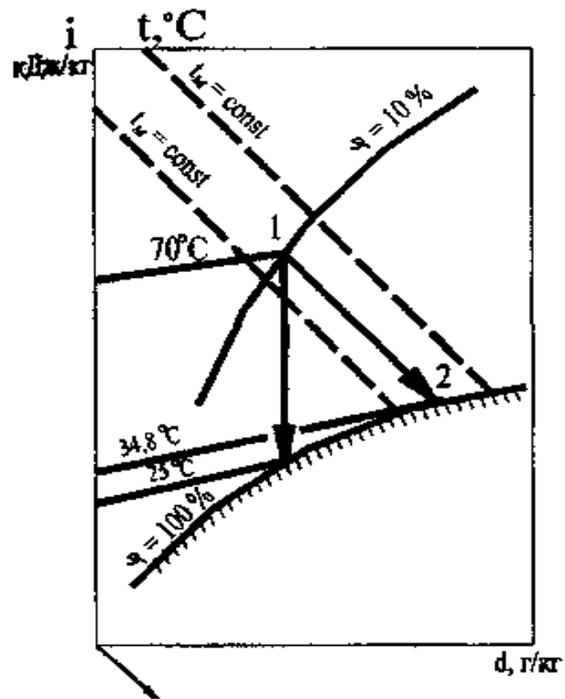


Рисунок 6.4

Для испарения 1 кг влаги потребуется сухого воздуха

$$M_{св} = m_e / \Delta d, \quad (56)$$

$$M_{св} = 1000 / 23,4 = 42,74 \text{ кг}$$

Количество теплоты, израсходованной в калорифере на нагревание 1 кг воздуха, находим по формуле

$$\Delta i = i_2 - i_1, \quad (57)$$

$$\Delta i = 118 - 38 = 80 \text{ кДж}$$

Количество теплоты, израсходованной в сушилке на 1 кг испаренной влаги, (на 42,74 кг сухого воздуха):

$$Q = \Delta i \cdot M_{с.в.} = 80 \cdot 42,74 = 3419,2 \text{ кДж.}$$

**Ответ:**  $d_3 = 0,0308 \text{ кг/кг}$ ;  $M_{с.в.} = 42,74 \text{ кг}$ ;  $Q = 3419,2 \text{ кДж}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 6.5.** Температура влажного воздуха 38 °С, а температура точки росы 30 °С. По d-i – диаграмме определить относительную влажность воздуха,

плотность влажного воздуха, энтальпию, влагосодержание и парциальное давление водяного пара.

**Ответ:**  $\varphi = 75 \%$ ,  $i = 105 \text{ кДж/кг}$ ,  $d = 28 \text{ г/кг}$ ,  $p_n = 4,22 \text{ кПа}$ ,  $\rho_g = 0,0029715 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 6.6.** Задано состояние влажного воздуха  $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_n = 0,015 \text{ МПа}$ . Определить относительную влажность, влагосодержание и плотность. Барометрическое давление  $B = 99325 \text{ Па}$  (745 мм рт. ст.).

**Ответ:**  $\varphi = 31,7 \%$ ,  $d = 110,6 \text{ г/кг}$ ,  $\rho_g = 0,0919 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 6.7.** В сушилку помещен материал, от которого нужно отнять 3000 кг воды. Температура наружного воздуха  $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $\varphi = 0,4$ , при входе в сушилку воздух подогревается и выходит из нее с  $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  при  $\varphi = 0,85$ .

Определить количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку.

**Ответ:**  $V_{\text{возд}} = 66445 \text{ м}^3$ .

**Задача 6.8.** Влажный воздух имеет температуру  $50^\circ\text{C}$  и относительную влажность 20 %. Определить по d-i - диаграмме влагосодержание, энтальпию и температуру точки росы.

**Ответ:**  $d = 0,016 \text{ кг/кг}$ ;  $i = 93 \text{ кДж/кг}$ ;  $t_p = 21^\circ\text{C}$ .

**Задача 6.9.** Воздух с начальными параметрами  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и  $\varphi = 90 \%$  нагревается в калорифере до температуры  $75^\circ\text{C}$ . Определить начальные значения влагосодержания, энтальпии, а также конечные значения влагосодержания, энтальпии, температуры мокрого термометра, парциального давления с использованием d-i - диаграммы.

**Ответ:**  $d_1 = 0,013 \text{ кг/кг}$ ;  $i_1 = 54 \text{ кДж/кг}$ ;  $d_2 = 0,013 \text{ кг/кг}$ ;  $i_2 = 15 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $\varphi_2 = 5,5 \%$ ;  $p_n = 1,8 \text{ кПа}$ .

**Задача 6.10.** Психрометр показывает  $t_m = 28^\circ\text{C}$  и  $t = 54^\circ\text{C}$ . Определить параметры влажного воздуха.

**Ответ:**  $\varphi = 15 \%$ ;  $P_n = 2,1 \text{ кПа}$ ;  $d = 0,014 \text{ кг/кг}$ ;  $i = 90 \text{ Дж/кг}$ ;  $t_p = 21^\circ\text{C}$ .

**Задача 6.11.** Влажный воздух с начальными параметрами  $t_1 = 30^\circ\text{C}$  и  $\varphi_1 = 80 \%$  охлаждается до  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ .

Определить параметры конечного состояния воздуха: относительную влажность, влагосодержание и энтальпию.

**Ответ:**  $\varphi_2 = 100 \%$ ;  $d_2 = 0,015 \text{ кг/кг}$ ;  $i_2 = 58 \text{ кДж/кг}$ .

**Задача 6.12.** Воздух при  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  и  $\varphi_1 = 50 \%$  подогревается в калорифере до температуры  $90^\circ\text{C}$  и направляется в сушилку, откуда он выходит при  $t_3 = 35^\circ\text{C}$ . Определить конечное влагосодержание воздуха, расход количества теплоты и воздуха на 1 кг испаренной влаги.

**Ответ:**  $d_3 = 0,032 \text{ кг/кг}$ ;  $q = 3070 \text{ кДж}$ ;  $m = 45,5 \text{ кг}$ .

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 7 ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ КАК ОДИН ИЗ ВИДОВ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Виды переноса теплоты: теплопроводность, конвекция, излучение. Сложный теплообмен. Температурное поле. Изотермическая поверхность. Градиент температуры. Основной закон теплопроводности. Коэффициент теплопроводности и коэффициент теплопередачи. Условия однозначности.

Теплопроводность в однослойной и многослойной плоской стенке при стационарном режиме. Теплопроводность в однослойной и многослойной цилиндрической стенке при стационарном режиме. Теплопередача через однослойную и многослойную плоские стенки при стационарном режиме. Коэффициент теплопередачи. Внешнее и внутреннее термическое сопротивление стенки. Теплопередача через однослойную и многослойную цилиндрические стенки при стационарном режиме. Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции. Выбор целесообразного материала тепловой изоляции. Пути интенсификации процесса теплопередачи. Теплопередача через ребренную стенку. Коэффициент ребрения.

### Методические указания

При изучении данной темы необходимо четко уяснить различие процессов переноса теплоты теплопроводностью, конвекцией и излучением, а также физическую сущность понятий «теплоотдача» и «теплопередача». При этом следует иметь в виду, что в чистом виде теплопроводность имеет место только в твердых телах, а конвекция в жидкостях и газах. Теплоотдача является необходимой составной частью теплопередачи и может быть конвективной, лучистой или совместной (сложной). Лучистый теплообмен между телами в отличие от теплопроводности и конвекции может осуществляться и в вакууме, т. е. при отсутствии промежуточной вещественной среды.

Рассматривая теплопроводность различных тел при стационарном режиме, следует обратить внимание на допущения, которые используются при выводе дифференциальных уравнений и получении их решений, позволяющих построить распределение температур по толщине стенки и найти общее количество теплоты, передаваемой через стенку. При оценке целесообразности применения изоляции для уменьшения тепловых потерь следует учесть, что критический диаметр изоляции не зависит от размеров трубопровода и определяется только значениями коэффициентов теплоотдачи от поверхности изоляции. При проектировании теплообменных аппаратов требуется интенсификация теплопередачи, т.е. уменьшение термического сопротивления, что может быть осуществлено увеличением теплопередающей поверхности со стороны наименьшего коэффициента теплоотдачи.

При изучении нестационарной теплопроводности необходимо обратить внимание на решение конкретных задач с помощью критериев Био и Фурье, твердо усвоив их физический смысл и влияние на протекание процессов нагревания тел.

### Рекомендуемая литература

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 189-208).
2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 142-155).
3. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 146-158).
4. Селин В.В. Теплотехника на рыбообрабатывающих предприятиях и промысловых судах. - М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1982. - 264 с. (с. 105-109).

### Контрольные вопросы и задания

1. Назовите виды переноса теплоты. В чем их различие?
2. Что называется температурным полем?
3. Дайте определение градиента температуры. Какова его размерность?
4. Сформулируйте основной закон теплопроводности.
5. Что характеризует коэффициент теплопроводности?
6. Как зависит коэффициент теплопроводности от температуры у жидких, твердых и газообразных тел? Какова его размерность?
7. Напишите дифференциальное уравнение теплопроводности для трехмерного нестационарного температурного поля.
8. Что характеризует коэффициент температуропроводности? Какова его размерность, и в чем проявляется связь с коэффициентом теплопроводности?
9. Каков закон распределения температуры по толщине плоской и

цилиндрической стенок?

10. Что называется температурным напором?

11. Как определить температуру между слоями в многослойных плоских и цилиндрических стенках?

12. Что называется теплопередачей? Приведите примеры.

13. Напишите уравнение теплопередачи и размерность входящих в него величин.

14. Что называется критическим диаметром изоляции и как он определяется?

15. Уменьшается ли с увеличением толщины изоляции цилиндрической трубы тепловой поток через нее?

### Примеры решения задач

**Задача 7.1.** Стены сушильной камеры выполнены из слоя красного кирпича толщиной 250 мм и слоя строительного войлока (рисунок 7.1). Температура на внешней поверхности кирпичного слоя  $t_{c1} = 110^\circ\text{C}$ , на внешней поверхности войлока  $t_{c3} = 25^\circ\text{C}$ . Коэффициенты теплопроводности красного кирпича и строительного войлока соответственно  $\lambda_1 = 0,7 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и  $\lambda_2 = 0,0465 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  и не зависят от температуры.

Вычислить температуру в плоскости соприкосновения слоев и определить толщину войлочного слоя при условии, что тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  стенки камеры не превышают  $q = 110 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

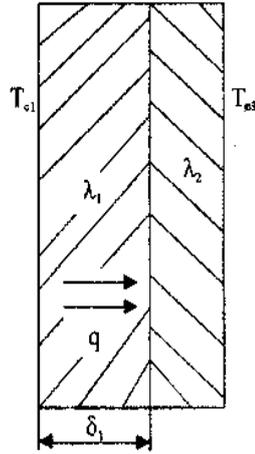


Рисунок 7.1

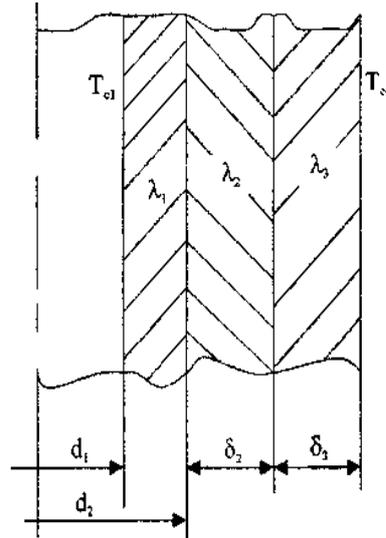


Рисунок 7.2

**Решение.** Для стационарного режима тепловой поток, проходящий через любую изотермическую поверхность неоднородной стенки, один и тот же, поэтому для каждого слоя можно записать

$$q = (\lambda_1 / \delta_1) \cdot (t_{c1} - t_{c2}); q = (\lambda_2 / \delta_2) \cdot (t_{c2} - t_{c3}), \quad (58)$$

где  $t_{c2}$  - температура в месте соприкосновения слоев, К;

$\delta_1, \delta_2$  - толщина слоев из кирпича и войлока соответственно, м;

$q$  - заданная плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

Из уравнений (58) определяем температурные напоры:

$$t_{c1} - t_{c2} = q \cdot \delta_1 / \lambda_1; \quad (59)$$

$$t_{c2} - t_{c3} = q \cdot \delta_2 / \lambda_2; \quad (60)$$

Из соотношения (59) находим температуру в месте соприкосновения слоев

$$t_{c2} = t_{c1} - q \cdot \delta_1 / \lambda_1;$$

$$T_{c2} = 383 - 110 \cdot 0,25 / 0,7 = 343,7 \text{ К.}$$

Из соотношения (60) определяем толщину войлочного слоя при заданных тепловых потерях

$$\delta_2 = \lambda_2 \cdot (T_{c2} - T_{c3}) / q, \quad (61)$$

$$\delta_2 = 0,0465 \cdot (343,7 - 298) / 110 = 0,0193 \text{ м}$$

**Ответ:**  $T_{c2} = 343,7 \text{ K}$ ;  $\delta_2 = 19,3 \text{ мм}$ .

**Задача 7.2.** Стальная труба, отношение диаметров которой  $d_1 / d_2 = 100 / 110 \text{ мм}$  [ $\lambda_1 = 50 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ ], покрыта изоляцией в два слоя одинаковой толщины  $\delta_2 = \delta_3 = 50 \text{ мм}$  (рисунок 7.2). Температура внутренней поверхности трубы  $t_{c1} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$ , наружной поверхности изоляции  $t_{c4} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Определить потери теплоты через изоляцию с 1 м длины трубы и температуру на границе соприкосновения слоев изоляции, если первый слой изоляции, накладываемый на поверхность трубы, выполнен из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2 = 0,06 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , а второй слой - из материала с  $\lambda_3 = 0,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

**Решение.** В случае многослойной цилиндрической стенки линейная плотность теплового потока  $q_i$  одинакова для каждого слоя. В общем случае для  $n$  слоев

$$q_1 = \pi \cdot (t_{c1} - t_{c,n+1}) / \sum_{i=1}^n [1/(2 \cdot \lambda_i) \cdot \ln(d_{i+1}/d_i)], \quad (62)$$

где  $\sum_{i=1}^n [1/(2 \cdot \lambda_i) \cdot \ln(d_{i+1}/d_i)]$  - полное термическое

сопротивление теплопроводности многослойной цилиндрической стенки.

Для рассматриваемого случая

$$q_1 = \pi \cdot (t_{c1} - t_{c4}) / [1/(2 \cdot \lambda_1) \cdot \ln(d_2/d_1) + 1/(2 \cdot \lambda_2) \cdot \ln(d_3/d_2) + 1/(2 \cdot \lambda_3) \cdot \ln(d_4/d_3)], \quad (63)$$

$$q_1 = 3,14 \cdot (250 - 50) / [1/(2 \cdot 50) \cdot \ln(110/100) + 1/(2 \cdot 0,06) \cdot \ln(210/110) + 1/(2 \cdot 0,12) \cdot \ln(310/210)] = 89,557 \text{ Вт/м}.$$

Температура на границе соприкосновения слоев определяется по формуле

$$t_{c,n+1} = t_{c1} - (q_1 / \pi) \cdot \sum_{i=1}^n [1/(2 \cdot \lambda_i) \cdot \ln(d_{i+1}/d_i)], \quad (64)$$

Тогда в соответствии с условием задачи

$$t_{c3} = t_{c1} - (q_1 / \pi) \cdot [1/(2 \cdot \lambda_1) \cdot \ln(d_2/d_1) + 1/(2 \cdot \lambda_2) \cdot \ln(d_3/d_2)], \quad (65)$$

$$t_{c3} = 250 - (89,557 / 3,14) \cdot [1 / (2 \cdot 50) \cdot \ln(110/100) + 1 / (2 \cdot 0,06) \cdot \ln(210/110)] =$$

$=96,33^{\circ}\text{C}$ .

**Ответ:**  $q_1 = 89,557 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{\text{сз}} = 96,33^{\circ}\text{C}$ .

**Задача 7.3.** Определить плотность теплового потока, проходящего через трехслойную стенку сушильной камеры (рисунок 7.3). Первый слой толщиной 300 мм выполнен из кирпича с  $\lambda_1 = 0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , второй слой - из строительного войлока толщиной 200 мм с  $\lambda_2 = 0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и третий слой - из асбеста толщиной 50 мм с  $\lambda_3 = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Определить также температуру внутренней и наружной поверхностей сушильной камеры, если через камеру проходит пар с температурой  $800^{\circ}\text{C}$ , а снаружи камера охлаждается воздухом с температурой  $20^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от пара к стенкам камеры  $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ , а от наружной стенки к воздуху -  $\alpha_2 = 50 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

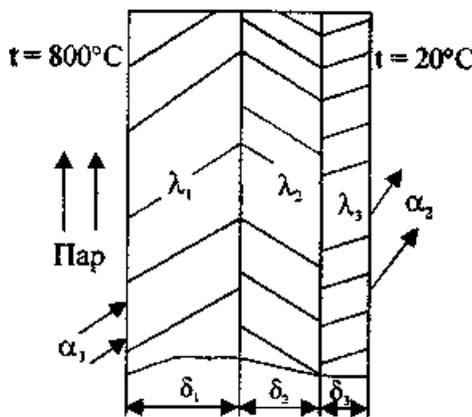


Рисунок 7.3

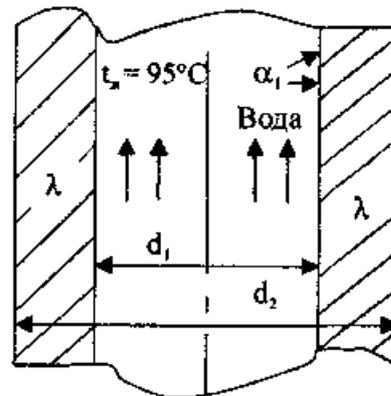


Рисунок 7.4

**Решение.** Плотность теплового потока, проходящего через многослойную стенку, определяется по формуле

$$q = k \cdot (t_{\text{жс1}} - t_{\text{жс2}}), \quad (66)$$

где  $k$  - коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ ;

$t_{\text{жс1}}$  - температура горячего теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\text{жс2}}$  - температура холодного теплоносителя,  $^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент теплопередачи для рассматриваемого случая

$$k = 1 / (1 / \alpha_1 + \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3 + 1 / \alpha_2) \quad (67)$$

Подставляя числовые значения величин в формулы (66) и (67), определяем плотность теплового потока

$$q = (800 - 20) / (1 / 100 + 0,3 / 0,6 + 0,2 / 0,05 + 0,05 / 0,1 + 1 / 50) = 155 \text{ Вт/м}^2.$$

Температуру внутренней поверхности сушильной камеры определяем из уравнения Ньютона - Рихмана с учетом направления теплового потока

$$q = \alpha_1 \cdot (t_{жс1} - t_{с1}), \quad (68)$$

где  $\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи от пара к внутренней поверхности сушильной камеры, Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Из уравнения (68) находим

$$t_{с1} = t_{жс1} - q / \alpha_1, \quad (69)$$

$$t_{с1} = 800 - 155 / 100 = 798,45^\circ\text{C}$$

Температуру наружной поверхности сушильной камеры определяем из уравнения

$$q = \alpha_2 \cdot (t_{с4} - t_{жс2}), \quad (70)$$

где  $\alpha_2$  - коэффициент теплоотдачи от наружной стенки сушильной камеры к воздуху, Вт/(м<sup>2</sup> · К)

$$t_{с4} = t_{жс2} - q / \alpha_2, \quad (71)$$

$$t_{с4} = 20 + 155 / 50 = 23,1^\circ\text{C}.$$

**Ответ:**  $q = 155 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{с1} = 798,45^\circ\text{C}$ ;  $t_{с4} = 23,1^\circ\text{C}$ .

**Задача 7.4.** Определить потери теплоты с 1 м длины неизолированного трубопровода с отношением диаметров  $d_1 / d_2 = 160 / 165$  мм, проложенного на открытом воздухе (рисунок 7.4), если внутри трубы протекает вода со средней температурой  $t_{жс1} = 95^\circ\text{C}$ , а температура окружающего воздуха составляет «минус»  $20^\circ\text{C}$ .

Коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda = 50 \text{ Вт/(м·К)}$ , коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности трубы  $\alpha_1 = 103 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ,

коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к окружающему воздуху равен  $\alpha_2 = 16 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить также температуру внутренней и внешней поверхностей трубы.

**Решение.** Потери теплоты с 1 м длины трубопровода определяем по формуле

$$q = k_1 \cdot \pi \cdot (t_{ж1} - t_{ж2}), \quad (72)$$

где  $k_1$ - линейный коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

$$k_1 = 1 / [1 / (\alpha_1 \cdot d_1) + 1 / (2 \cdot \lambda) \cdot \ln(d_2/d_1) + 1 / (\alpha_2 \cdot d_2)], \quad (73)$$

$$k_1 = 1 / [1 / (10^3 \cdot 0,16) + 1 / (2 \cdot 50) \cdot \ln(0,165/0,16) + 1 / (16 \cdot 0,165)] = 2,595 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$$

Определяем плотность теплового потока на 1 м трубы

$$q_1 = 2,595 \cdot 3,14 \cdot (95 + 20) = 937,53 \text{ Вт}/\text{м}.$$

Температура внутренней поверхности трубы

$$t_{c1} = t_{ж1} - q_1 / (\pi \cdot \alpha_1 \cdot d_1), \quad (74)$$

$$t_{c1} = 95 - 937,53 / (3,14 \cdot 10^5 \cdot 0,16) = 93,13^\circ\text{С}.$$

Температура внешней поверхности трубы

$$t_{c2} = t_{ж2} + q_1 / (\pi \cdot \alpha_2 \cdot d_2), \quad (75)$$

$$t_{c2} = -20 + 937,53 / (3,14 \cdot 16 \cdot 0,165) = 93,04^\circ\text{С}.$$

**Ответ:**  $q_1 = 937,53 \text{ Вт}/\text{м}$ ;  $t_{c1} = 93,13^\circ\text{С}$ ;  $t_{c2} = 93,04^\circ\text{С}$ .

**Задача 7.5.** Цилиндрическая труба с наружным диаметром 100 мм (рисунок 7.5) покрыта однослойной изоляцией с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{из} = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ . Коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к окружающей среде  $\alpha_2 = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Целесообразно ли применять в данном случае изоляционный материал с заданными свойствами для уменьшения потерь теплоты?

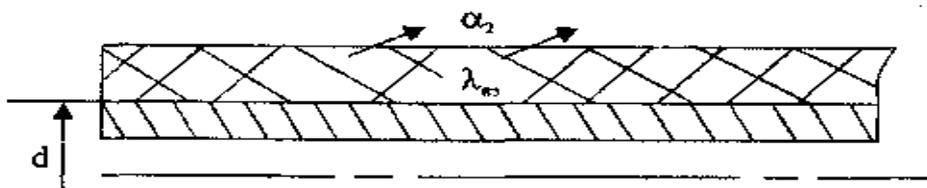


Рисунок 7.5

**Решение.** Для эффективного использования изоляции с целью снижения потерь теплоты необходимо, чтобы критический диаметр изоляции был меньше внешнего диаметра оголенного трубопровода:  $d_{кр} < d_2$ . Условие уменьшения тепловых потерь выражается соотношением

$$\lambda_{уз} \leq \alpha_2 \cdot d_2 / 2. \quad (76)$$

Определяем критический диаметр изоляции

$$d_{кр} = 2 \cdot \lambda_{уз} / \alpha_2, \quad (77)$$

$$d_{кр} = 2 \cdot 0,2 / 5 = 0,08 \text{ м} = 80 \text{ мм}.$$

**Ответ:** в данном случае  $d_{кр} < d_2$  и применение изоляционного материала с  $\lambda_{уз} = 0,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  целесообразно.

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 7.6.** Плоская стенка выполнена из материала с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 20 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ , толщина стенки -  $\delta = 10 \text{ мм}$ . На одной стороне стенки температура  $t_{c1} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ , на другой -  $t_{c2} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Найти плотность теплового потока через стенку и температуру в середине стенки.

**Ответ:**  $q = 20 \text{ Вт/м}^2$ ;  $t_{cp} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Задача 7.7.** Стенка промышленной нагревательной печи состоит из трех слоев. Первый слой – плотный шамотный кирпич толщиной  $\delta_1 = 250 \text{ мм}$ ; второй слой – легковесный шамотный кирпич толщиной  $\delta_2 = 500 \text{ мм}$ . Максимальная температура в первом слое  $t_{c1} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ . Третий слой – тепловая изоляция (шлаковая вата). На внешней поверхности третьего слоя температура -  $t_{c4} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура воздуха в помещении  $t_g = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплоотдачи от внешней стенки печи окружающему воздуху  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ .

Чему равна толщина слоя шлаковой ваты  $\delta_3$ ? Коэффициенты теплопроводности материалов слоев стенки соответственно находятся по следующим

зависимостям:

$$\lambda_1 = 1,06 + 0,0008 \cdot t_{cp1}; \lambda_2 = 0,79 + 0,00035 \cdot t_{cp2}; \lambda_3 = 0,06 + 0,000145 \cdot t_{cp3},$$

где  $t_{cp}$  – температура в середине соответствующего слоя стенки, например, для первого слоя  $t_{cp1} = (t_{c1} + t_{c2})/2$ .

**Ответ:**  $\delta_3 = 350$  мм.

**Задача 7.8.** Внутри трубопровода с отношением диаметров  $d_1 / d_2 = 160 / 170$  мм протекает вода со средней температурой  $85^\circ\text{C}$ . Снаружи трубопровод изолирован асбестом с  $\lambda_2 = 0,106$  Вт/(м·К). Наружный диаметр изоляции составляет 190 мм. Температура окружающей среды -  $t_{жс2} = 10$  °С. Коэффициент теплопроводности материала трубопровода -  $\lambda_1 = 50$  Вт/(м·К).

Определить тепловые потери с 1 м длины изоляции, температуру на внутренней и внешней поверхностях трубопровода, а также на внешней поверхности изоляции, если коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубопровода и от внешней поверхности изоляции к воздуху соответственно равны:  $\alpha_1 = 1000$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) и  $\alpha_2 = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

**Ответ:**  $q_1 = 222,74$  Вт/м;  $t_{c1} = 84,56^\circ\text{C}$ ;  $t_{c2} = 84,51^\circ\text{C}$ ;  $t_{c3} = 47,31^\circ\text{C}$

**Задача 7.9.** Плоская стальная стенка толщиной 10 мм [с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_1 = 50$  Вт/(м·К)] с одной стороны омывается газами, при этом коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1 = 25$  Вт/(м·К). С другой стороны стенка изолирована от окружающего воздуха плотно прилегающей к ней пластиной толщиной 20 мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_2 = 0,15$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от пластины к воздуху равен  $\alpha_2 = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определить плотность теплового потока и температуру поверхностей стенки, если температура газов  $300^\circ\text{C}$ , а воздуха -  $5^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $q = 1078,3$  Вт/м<sup>2</sup>;  $t_{c1} = 256,9^\circ\text{C}$ ;  $t_{c2} = 256,6^\circ\text{C}$ ;  $t_{c3} = 112,8^\circ\text{C}$ ;

**Задача 7.10.** Цилиндрическая труба с наружным диаметром  $d_2 = 40$  мм покрыта слоем изоляции с коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,106$  Вт/(м·К). Коэффициент теплоотдачи от изоляции к внешней среде равен

4,0 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

Снижает ли изоляция тепловые потери в окружающую среду?

**Ответ:** применение данной изоляции нецелесообразно, т. к. тепловые потери при ее использовании не уменьшаются:  $d_{кр} > d_2$

**Задача 7.11.** Определить количество переданного тепла через 1 м<sup>2</sup> стенки (рисунок 7.6), холодная сторона которой оребрена. Коэффициент оребрения равен  $F_2 / F_1 = 13$ , где  $F_1$  – площадь гладкой поверхности,  $F_2$  – площадь оребренной поверхности. Толщина стенки  $\delta = 10$  мм, коэффициент теплопроводности материала стенки -  $\lambda = 40$  Вт/(м · К). Коэффициенты теплоотдачи соответственно равны  $\alpha_1 = 200$  Вт/(м<sup>2</sup> · К) и  $\alpha_2 = 10$  Вт/(м<sup>2</sup> · К). Температура горячего теплоносителя  $t_{ж1} = 75$  °С, а холодного  $t_{ж2} = 15$  °С. Определите, во сколько раз оребрение поверхности увеличит теплопередачу.

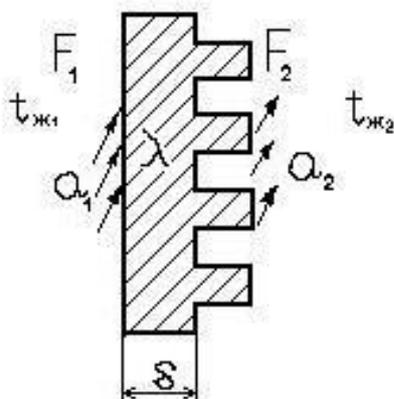


Рисунок 7.6

**Ответ:** оребрение поверхности позволяет увеличить теплопередачу более, чем в восемь раз.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 8

### КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Виды движения теплоносителя. Пограничный слой. Подобие физических процессов. Числа подобия. Критериальные уравнения. Теплообмен при

вынужденном движении теплоносителя в трубах. Теплоотдача при поперечном обтекании труб. Теплоотдача при свободном движении теплоносителя. Теплообмен при изменении агрегатного состояния вещества.

### Методические указания

Из всех видов теплообмена конвективный теплообмен является наиболее сложным для исследования, поскольку при расчетах передачи теплоты конвекцией необходимо знать числовые значения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  для каждого конкретного случая. Следует иметь в виду, что роль  $\alpha$  не аналогична роли коэффициента теплопроводности в законе Фурье, так как  $\lambda$  является теплофизическим параметром среды, значение которого может быть взято из справочных таблиц. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  представляет собой сложную функцию тепловых и динамических процессов, развивающихся в среде в непосредственной близости от поверхности теплообмена, которая зависит от режима движения теплоносителя, теплофизических свойств теплоносителя и геометрических факторов, связанных с конфигурацией системы конвективного теплообмена. Система уравнений, определяющая конвективный теплообмен, позволяет определить  $\alpha$  только для ограниченного числа простейших задач и то с определенными допущениями. В общем случае определение  $\alpha$  приводит к необходимости проведения большого числа экспериментов на натурном объекте исследования. Отмеченные трудности устраняются при использовании теории подобия физических процессов, позволяющей проводить исследования на модели, а результаты опытов на модели распространить на все подобные явления. Теория подобия позволяет получить критериальные уравнения для определения коэффициента теплоотдачи. Необходимо четко уяснить физический смысл основных критериев и уметь применять их в составе тех критериальных зависимостей, которые соответствуют конкретной задаче при рассмотрении конвективного теплообмена.

### Рекомендуемая литература

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 238-298).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 160-165).

1. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 163-188)

### Контрольные вопросы и задания

1. Что называется конвективным теплообменом?
2. Сформулируйте основной закон теплоотдачи конвекцией.
3. Дайте определения динамического и теплового пограничного слоев и объясните их физический смысл.
4. Назовите виды движения жидкости или газа. Объясните их физический смысл.
5. Какими числами подобия характеризуется конвективный теплообмен?
6. Что называется коэффициентом теплоотдачи? Функцией каких параметров он является?
7. Каков механизм передачи теплоты при ламинарном и турбулентном движениях жидкости?
8. Что характеризуют числа Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля, Грасгофа, и как они определяются?
9. До какого значения числа Рейнольдса поток жидкости не может переходить из ламинарного в турбулентный режим?
10. Какие уравнения подобия рекомендуются при исследовании ламинарного, переходного и турбулентного движения жидкости?
11. Опишите гидродинамическую картину омывания теплоносителем

одиночной трубы и пучка труб.

12. Опишите характерную картину свободного движения жидкости у вертикальной стенки.

13. Какими уравнениями подобия определяется теплоотдача при свободном движении жидкости?

### Примеры решения задач

**Задача 8.1.** По горизонтально расположенной стальной трубе с отношением диаметров  $d_1/d_2 = 110 / 130$  мм и  $\lambda = 50$  Вт/(м · К) со скоростью  $w = 2$  м /с течет вода с температурой  $100^\circ\text{C}$ . Снаружи труба охлаждается окружающим воздухом, температура которого равна  $2^\circ\text{C}$ , а коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху  $\alpha_2 = 10$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha_1$  от воды к внутренней поверхности трубы, коэффициент теплопередачи  $k_1$  и тепловой поток, отнесенный к 1 м длины трубы.

**Решение.** По таблице 8 приложения определяем физические параметры воды при заданных условиях:

$$t_{ж1} = 100^\circ\text{C} = 373\text{ K}; \nu_{ж1} = 0,295 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{ж1} = 0,683 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); Pr_{ж1} = 1,75.$$

Находим число Рейнольдса

$$Re_{ж1} = w \cdot d_1 / \nu_{ж1}, \quad (78)$$

$$Re_{ж1} = 2 \cdot 0,11 / (0,295 \cdot 10^{-6}) = 0,746 \cdot 10^6.$$

Так как  $Re_{ж1} > 10^4$ , то режим движения - турбулентный. Для определения среднего коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном движении может быть использована формула

$$Nu_{ж1} = 0,021 \cdot Re_{ж1}^{0,8} \cdot Pr_{ж1}^{0,43} \cdot (Pr_{ж1} / Pr_{ст.1})^{0,25}, \quad (79)$$

Учитывая, что коэффициент теплоотдачи от воды к внутренней поверхности трубы будет значительно больше коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху, можно принять  $t_{ст.1} \approx t_{ж1}$  и, следовательно,  $Pr_{ж1} \approx Pr_{ст.1}$ . Тогда

$$Nu_{ж1} = 0,021 \cdot Re_{ж1}^{0,8} \cdot Pr_{ж1}^{0,43} = 0,021 \cdot (0,746 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 1,75^{0,43} = 1333,266.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_1 = Nu_{жс1} \cdot \lambda_{жс1} / d_1, \quad (80)$$

$$\alpha_1 = 1333,266 \cdot 0,683 / 0,11 = 8278,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Теплоотдача от внешней поверхности трубы к воздуху осуществляется за счет естественной конвекции и по условию задачи  $\alpha_2 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Линейный коэффициент теплопередачи будет равен

$$k_l = 1 / [1 / (\alpha_1 \cdot d_1) + 1 / (2 \cdot \lambda) \cdot \ln(d_2/d_1) + 1 / (\alpha_2 \cdot d_2)], \quad (81)$$

$$k_l = 1 / [1 / (8278,4 \cdot 0,11) + 1 / (2 \cdot 50) \cdot \ln(0,13/0,11) + 1 / (10 \cdot 0,13)] = 1,295 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Тепловой поток, отнесенный к 1 м длины трубы, составит

$$q_l = k_l \cdot \pi \cdot (t_{жс1} - t_{жс2}), \quad (82)$$

$$q_l = 1,295 \cdot 3,14 \cdot (100 - 2) = 398,7 \text{ Вт}/\text{м}.$$

**Ответ:**  $\alpha_1 = 8278,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); k_l = 1,295 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); q_l = 398,7 \text{ Вт}/\text{м}.$

**Задача 8.2.** Определить коэффициент теплоотдачи и количество переданной теплоты при течении воды со скоростью  $w = 0,08 \text{ м}/\text{с}$  в горизонтальной трубе диаметром  $d = 0,008 \text{ м}$ , если температура воды  $t_{жс} = 90^\circ\text{C}$ , а температура внутренней поверхности трубы  $t_{см.1} = 30^\circ\text{C}$ .

**Решение.** При температуре воды  $t_{жс} = 90^\circ\text{C}$  по таблице 8 приложения находим физические характеристики воды:

$$\lambda_{жс} = 68 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); \nu_{жс1} = 0,326 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; Pr_{жс1} = 1,95; \beta_{жс} = 6,95 \cdot 10^{-4} 1/\text{К}; T_{см} = 303 \text{ К}; Pr_{см} = 5,42.$$

С учетом полученных значений определяем режим движения воды в горизонтальной трубе

$$Re_{жс} = 0,08 \cdot 0,008 / (0,325 \cdot 10^{-6}) = 1963,2.$$

Так как  $Re_{жс1} < Re_{кр}$  ( $Re_{жс1} < 2320$ ), то режим движения - ламинарный.

При ламинарном режиме движения жидкости для определения коэффициента теплоотдачи используем формулу

$$Nu_{жс} = 0,15 \cdot Re_{жс}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot C_{2жс}^{0,1} \cdot (Pr_{жс} / Pr_{см})^{0,25} \quad (83)$$

$$\alpha = Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс} / d \quad (84)$$

Температурный напор равен  $\Delta T = t_{жс} - t_{см} = 60^\circ\text{C}$ . Все остальные величины в формуле для определения числа Грасгофа известны. Тогда

$$Gr_{жс} = g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot \Delta T / \nu_{жс}^2, \quad (85)$$

$$Gr_{жс} = 9,81 \cdot 0,008^3 \cdot 6,95 \cdot 10^{-4} \cdot 60 / (0,326 \cdot 10^{-6})^2 = 1,97 \cdot 10^6.$$

По формулам (83) и (84) определяем число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности трубы

$$Nu_{жс} = 0,15 \cdot (1063,2)^{0,33} \cdot (1,95)^{0,43} \cdot (1,97 \cdot 10^6)^{0,1} \cdot (1,95 / 5,42)^{0,25} = 8,05267$$

$$\alpha = 8,05267 \cdot 0,68 / 0,008 = 684,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

В коротких трубах на коэффициент теплоотдачи начинает оказывать влияние начальный участок трубы. Однако в данном случае поправку на длину трубы вводить не следует, так как  $1 / d = 800 / 0,8 > 50$ . Количество передаваемой теплоты через всю поверхность трубы

$$Q = \pi \cdot d \cdot \alpha \cdot l \cdot (t_{жс} - t_{см}), \quad (86)$$

$$Q = 3,14 \cdot 0,008 \cdot 684,5 \cdot 8 \cdot 60 = 8253,4 \text{ Вт}.$$

**Ответ:**  $\alpha = 684,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); Q = 8253,4 \text{ Вт}.$

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 8.3.** Определить коэффициент теплоотдачи и количество переданной теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром 0,02 м и длиной 10 м со скоростью 0,3 м/с, если температура воды  $80^\circ\text{C}$ , а температура стенки трубы  $30^\circ\text{C}$ .

**Ответ:**  $\alpha = 1879 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); Q = 59 \text{ кВт}.$

**Задача 8.4.** Воздух течет внутри трубы, имея среднюю температуру  $600^\circ\text{C}$ , давление  $P = 101,3 \text{ кПа}$  и скорость 6 м/с.

Определить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  от воздуха к трубе, а также удельный тепловой поток  $q$ , отнесенный к 1 м длины трубы, если внутренний диаметр трубы  $d = 60 \text{ мм}$ , толщина  $h = 4 \text{ мм}$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda = 20 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$

Снаружи труба омывается горячими газами. Температура и коэффициент теплоотдачи газов, омывающих трубу, соответственно равны 180 °С и 40 Вт/(м<sup>2</sup> · К).

**Ответ:**  $\alpha_1 = 31,1 \text{ 20 Вт/(м} \cdot \text{К)}.$ ;  $q = 1451,4 \text{ Вт/м}.$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 9

### РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Классификация теплообменных аппаратов, основы теплового расчета теплообменных аппаратов.

#### Методические указания

При тепловом расчёте различных теплообменных аппаратов при стационарном режиме, следует обратить внимание на допущения, которые используются при выводе дифференциальных уравнений и получении их решений, позволяющих построить распределение температур по толщине стенки и найти общее количество теплоты, передаваемой через стенку. При оценке целесообразности применения изоляции для уменьшения тепловых потерь следует учесть, что критический диаметр изоляции не зависит от размеров трубопровода и определяется только значениями коэффициентов теплоотдачи от поверхности изоляции. При проектировании теплообменных аппаратов требуется интенсификация теплопередачи, т.е. уменьшение термического сопротивления, что может быть осуществлено увеличением теплопередающей поверхности со стороны наименьшего коэффициента теплоотдачи.

При изучении нестационарной теплопроводности необходимо обратить внимание на решение конкретных задач с помощью критериев Био и Фурье, твердо усвоив их физический смысл и влияние на протекание процессов нагревания тел.

#### Рекомендуемая литература

1. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учеб. пособие для вузов / В. В. Нащокин. - Изд. 4-е, стер. - [Москва] : Аз-book, 2008. - 468, [1] с. : ил. - Библиогр.: с. 463. - (с. 308-438).

2. Овсянников, М. К. Теплотехника : Техническая термодинамика и теплопередача : учебник для вузов / М. К. Овсянников, И. И. Костылев. - Санкт-

Петербург : Элмор, 1998. - 208 с. (с. 166-201).

2. Круглов, Г. А. Теплотехника : учеб. пособие для вузов / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. - Изд. 2-е, стер. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2012. - 207 с. (с. 189-201)

### Вопросы и задания для самопроверки

1. По каким принципам классифицируют теплообменные аппараты?
2. Как определить температуру между слоями в многослойных плоских и цилиндрических стенках?
3. Что называется критическим диаметром изоляции и как он определяется?
4. Уменьшается ли с увеличением толщины изоляции цилиндрической трубы тепловой поток через нее?
5. Назовите основные параметры теплового расчета теплообменных аппаратов?

### Примеры решения задач

**Задача 9.1.** Подогреватель питательной воды котельной установки изготовлен из труб с наружным диаметром  $d = 30$  мм, расположенных в шахматном порядке, с поперечными и продольными шагами  $S_1 = S_2 = 2,5$ . Число труб в ряду  $m = 8$ , число рядов  $n = 6$ . Трубы расположены поперек потока. Температура воздуха, поступающего в подогреватель,  $t_{жс1} = 400^\circ\text{C}$ , а на выходе из подогревателя  $t_{жс2} = 300^\circ\text{C}$ . Средняя температура наружной поверхности труб  $t_{ст.} = 150^\circ\text{C}$ .

Скорость воздуха в узком сечении пучка труб  $w = 10$  м/с. Какой длины должны быть трубы, чтобы тепловой поток, передаваемый воде, протекающей внутри труб, был равен 300 кВт?

**Решение.** Средняя температура воздуха в подогревателе

$$t_{жс} = 0,5 \cdot (t_{жс1} + t_{жс2}), \quad (87)$$

$$t_{жс} = 0,5 \cdot (400 + 300) = 350^{\circ}\text{C}$$

Теплофизические свойства воздуха при  $t_{жс} = 350^{\circ}\text{C}$  определяем по таблице 9 приложения

$$\nu_{жс} = 55,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{жс} = 0,0491 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); Pr_{жс} = 0,676$$

Определяем число Рейнольдса

$$Re_{жс} = 10 \cdot 0,03 / (55,46 \cdot 10^{-6}) = 5409$$

Для третьего ряда шахматного пучка

$$Nu_{жс} = 0,41 \cdot Re_{жс}^{0,6} \cdot Pr_{жс}^{0,33} = 0,41 \cdot 5409^{0,6} \cdot 0,675^{0,33} = 62,6$$

$$\alpha_3 = Nu_{жс} \cdot \lambda_{жс} / d$$

$$\alpha_3 = 62,6 \cdot 0,0491 / 0,03 = 102,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Средний коэффициент теплоотдачи шахматного пучка

$$\alpha_{ср} = [0,6 \cdot \alpha_3 + 0,7 \cdot \alpha_3 + (n - 2) \cdot \alpha_3] / n = \alpha_3 \cdot (1 - 0,7 / n), \quad (88)$$

$$\alpha_{ср} = 102,4 \cdot (1 - 0,7 / 6) = 90,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Определяем плотность теплового потока

$$q = \alpha_{ср} \cdot (t^* - t_{сн}), \quad (89)$$

$$q = 90,5 \cdot (350 - 150) = 18,09 \text{ кВт}/\text{м}^2$$

Требуемая поверхность нагрева

$$F = Q / q, \quad (90)$$

$$F = 300 \cdot 10^3 / 18090 = 16,6 \text{ м}^2$$

Подставив известные значения величин в формулу для определения необходимой длины трубы, получим

$$l = F / (\pi \cdot d \cdot m \cdot n), \quad (91)$$

$$l = 16,6 / (3,14 \cdot 0,03 \cdot 8 \cdot 6) = 3,67 \text{ м}$$

**Ответ:** при заданных условиях задачи  $l = 3,67 \text{ м}$ .

**Задача 9.2.** В теплообменнике цилиндрическая труба с наружным диаметром 40 мм, и длиной 6 м охлаждается поперечным потоком воды с температурой  $20^{\circ}\text{C}$ . Скорость течения воды 3 м/с. Температура наружной поверхности трубы равна  $90^{\circ}\text{C}$ . Угол атаки  $50^{\circ}$ .

Определить коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к охлаждающей воде и количество передаваемой теплоты.

**Решение.** Определяем физические характеристики охлаждающей воды при  $t_{жс}=20^{\circ}\text{C}$ :

$$\nu_{жс} = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \lambda_{жс} = 0,599 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}); Pr_{жс} = 7,02; Pr_{см} = 1,95.$$

При заданных условиях

$$Re_{жс} = 3 \cdot 0,04 / (1,01 \cdot 10^{-6}) = 118812.$$

Так как полученное число Рейнольдса лежит в диапазоне от  $1 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^5$ , то число Нуссельта может быть определено по формуле

$$Nu_{жс} = 0,25 \cdot Re_{жс}^{0,6} \cdot Pr_{жс}^{0,38} \cdot (Pr_{жс} / Pr_{см})^{0,25}, \quad (92)$$

$$Nu_{жс} = 0,25 \cdot (118812)^{0,6} \cdot (7,02 / 1,95)^{0,25} = 1921,$$

и тогда  $\alpha$  по формуле (84)

$$\alpha = 1921 \cdot 0,599 / 0,04 = 28767 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

С учетом угла атаки, определяем поправочный коэффициент

$$\alpha_{Д} = 28767 \cdot 0,87 = 25027,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}),$$

где  $\varepsilon_{\varphi}$  - поправочный коэффициент. Для угла атаки  $50^{\circ}$  -  $\varepsilon_{\varphi} = 0,87$ .

Количество теплоты, передаваемое трубе, равно

$$Q = \pi \cdot d \cdot l \cdot \alpha_{Д} \cdot (t_{нар.нов} - t_{жс}), \quad (93)$$

где  $t_{нар.нов}$  - температура наружной поверхности трубы,  $^{\circ}\text{C}$ .

$$Q = 3,14 \cdot 0,04 \cdot 6 \cdot 25027,3 \cdot 70 = 1320 \text{ кВт}$$

**Ответ:**  $\alpha_{Д} = 25027,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}); Q = 1320 \text{ кВт}$ .

### Задачи для самостоятельного решения

**Задача 9.3.** Определить потери теплоты в теплообменнике при свободной конвекции вертикально расположенного трубопровода диаметром  $D = 150$  мм и высотой

$H = 5$  м, если температура стенки трубопровода  $200^{\circ}\text{C}$ , а температура окружающего воздуха  $30^{\circ}\text{C}$ .

**Ответ:**  $Q = 3613 \text{ Вт}$ .

**Задача 9.4.** Определить средний коэффициент теплоотдачи конвекцией от поперечного потока дымовых газов к стенкам восьмирядного пучка труб горизонтального теплообменника. Трубы диаметром  $d = 60$  мм расположены в шахматном порядке. Средняя скорость потока газов в самом узком сечении пучка  $\omega = 10$  м/с. Температура газов перед пучком  $T_{ж1} = 1473$  К, за пучком -  $T_{ж2} = 1073$  К. Загрязнение труб пучка не учитывать. Одновременно для сравнения вести расчет для коридорного расположения пучка труб.

Сделать вывод о том, при каком расположении труб условия теплоотдачи лучше.

**Ответ:**  $\alpha_{кор} = 71,9$  Вт/(м · К);  $\alpha_{шах} = 73,4$  Вт/(м · К).

*Теплоотдача в пучках с шахматным расположением труб выше, чем с коридорным ( в данном случае приблизительно на 3 %).*

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1 - **Физические постоянные основных газов**

Газ	Химическая формула	Молярная масса, кг/кмоль	Удельная газовая постоянная, R, Дж/(кг · К)	Плотность при нормальных физических условиях, кг/м <sup>3</sup>
Воздух	-	28,960	287,0	1,293
Кислород	O <sub>2</sub>	32,000	259,8	1,429
Азот	N <sub>2</sub>	28,020	296,8	1,250
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	4124,3	0,090
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	461,6	0,804
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44,000	189,0	1,977
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,031	488,2	0,771
Оксид углерода	CO	28,010	296,8	1,250

Таблица 2 - **Средняя массовая теплоемкость [ $\bar{C}_p$ , кДж/(кг·К)] газов при постоянном давлении**

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	C <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Воздух (сухой)
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	1,0036
100	0,9232	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	1,0115
300	0,9500	1,0400	1,0538	0,9487	1,9192	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9828	1,9477	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0133	1,9779	1,0393
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	1,0710
900	1,0258	1,0982	1,1200	1,1045	2,1097	1,0815
1000	1,0390	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	1,0907
1100	1,0434	1,1170	1,1401	1,1384	2,1771	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,1493	1,1530	2,2106	1,1082
1300	1,0583	1,1342	1,1577	1,1660	2,2429	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1996	2,3346	1,1380
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,3630	1,1443
1800	1,0886	1,1690	1,1924	1,2179	2,3907	1,1501
1900	1,0940	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	1,1560
2000	1,0990	1,1803	1,2033	1,2334	2,4422	1,1610

Таблица 3 - Средняя массовая теплоемкость [ $\bar{C}_v$ , кДж/(кг·К)] газов при постоянном объеме

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух (сухой)
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,3980	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,6770	1,4114	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,7243
300	0,6900	0,7448	0,7570	0,7599	1,4574	0,7319
400	0,7051	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,8240	1,5160	0,7519
600	0,7327	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,6140	0,7842
900	0,7658	0,8030	0,8231	0,9157	1,6483	0,7942
1000	0,7750	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,8215
1300	0,7984	0,8390	0,8608	0,9772	1,7815	0,8294
1400	0,8051	0,8470	0,8688	0,9893	1,8129	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,8830	1,0107	1,8728	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	0,8570
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	0,8633
1900	0,8340	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	0,8688
2000	0,8390	0,8847	0,9064	1,0446	1,9804	0,8742

Таблица 4 - Средняя объемная теплоемкость [ $\bar{C}_p$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К)] газов при постоянном давлении

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух (сухой)
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,4930	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,5020	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	1,3289
500	1,3980	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,3720	2,0884	1,6412	1,3708
800	1,4499	1,3670	1,3862	2,1311	1,6680	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3896	2,1692	1,6957	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	1,4097
1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2636	1,7769	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,8250	1,4528
1500	1,5294	1,4440	1,4658	2,3354	1,8527	1,4620
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	1,4701
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	1,4788
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	1,5010

Таблица 5 - Средняя объемная теплоемкость [ $\bar{C}_v$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К)] газов при постоянном объеме

t, °C	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Воздух (сухой)
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	0,9579
500	1,0270	0,9576	0,9718	1,6178	1,2188	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	0,9998
800	1,0789	0,9960	1,0153	1,7601	1,2971	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,8640	1,3791	1,0505
1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,4570	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	1,1296

**Таблица 6 - Сухой насыщенный пар и вода на пограничных кривых  
(по температурам)**

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{и}, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$i', \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$i'', \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s', \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$s'', \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
0	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0,000	2500,8	2500,8	0,000	9,1644
10	0,0012271	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519,2	2477,3	0,0762	8,8995
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537,2	2453,4	0,2964	8,6663
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03036	125,69	2555,6	2430,0	0,4367	8,4523
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,51	2573,6	2406,1	0,5723	8,2560
50	0,012335	0,0010121	12,05	0,08302	209,30	2573,6	2382,3	0,7038	8,0751
60	0,01992	0,0010171	7,678	0,1302	251,12	2591,6	2358,0	0,8311	7,9084
70	0,03116	0,0010238	5,045	0,1982	292,99	2609,2	2333,3	0,9550	7,7544
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	376,98	2626,4	2282,5	1,1924	7,4785
110	0,14327	0,0010515	1,210	0,8263	416,34	2659,5	2230,0	1,4185	7,2386
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,4	2720,6	2174,2	1,6345	7,0271
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746,5	2114,3	1,8418	6,8383
170	0,7920	0,0011144	0,242600	4,122	719,3	2768,7	2049,4	2,0419	6,6666
190	1,2553	0,0011415	0,156400	6,395	807,6	2786,3	1978,7	2,2358	6,5075
210	1,9080	0,0022726	0,104400	9,578	897,6	2798,0	1900,4	2,4246	6,3577
230	2,7979	0,0012087	0,071470	13,99	990,2	2803,1	1812,7	2,6101	6,2132
250	3,978	0,0012512	0,050050	19,98	1086,1	2801,0	1714,9	2,7934	6,0721
270	5,505	0,0013023	0,035600	28,09	1185,3	2789,7	1604,4	2,9764	5,9298
290	7,445	0,013655	0,025530	39,17	1290,0	2766,2	1476,3	3,1610	5,7824
310	9,306	0,0014036	0,018310	54,61	1402,2	2727,3	1325,1	3,3507	5,6233
330	12,864	0,0015620	0,012970	77,09	1526,1	2665,7	1139,6	3,5521	5,4412
350	16,537	0,0017410	0,008805	113,6	1671,4	2564,4	893,0	3,7786	5,2117
370	21,053	0,0022200	0,00493	202,4	1892,4	2330,8	438,4	4,1135	4,7951
47	22,087	0,0028000	0,0034	288,0	2031,9	2147,0	114,7	4,3258	4,5029

Таблица 7 - Сухой насыщенный пар и вода на пограничных кривых (по давлению)

$P_n$ , МПа	$t_s$ , °С	$v'$ , м <sup>3</sup> /кг	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$i'$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$i''$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s'$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$s''$ , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	0,00769	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	0,02185	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,005	32,89	0,0010054	28,24	0,03541	137,79	2560,9	2423,1	0,4764	8,3943
0,008	41,53	0,0010085	18,13	0,05516	173,80	2576,4	2402,5	0,5919	8,2273
0,014	52,57	0,0010132	10,69	0,09353	220,05	2596,0	2376,0	0,7368	8,0305
0,020	60,08	0,0010171	7,652	0,1307	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,030	69,12	0,0010223	5,232	0,1911	289,3	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,05	81,33	0,0010299	3,243	0,3083	340,5	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,08	93,50	0,0010385	2,089	0,4787	391,7	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,12	104,80	0,0010472	1,430	0,6992	439,34	2683,0	2243,6	1,3610	7,2972
0,16	113,31	0,0010643	1,092	0,9160	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	504,7	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,30	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,7	2725,5	2163,8	1,6716	6,9922
0,40	143,62	0,0010826	0,4623	2,163	604,3	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,6	158,84	0,0011009	0,3156	3,169	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
0,8	170,41	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	5,143	762,4	2777,8	2015,3	2,1383	6,5867
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,125	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
1,4	195,04	0,0011488	0,1408	7,102	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,6	201,36	0,0011587	0,1238	8,080	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	9,055	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
2,0	212,36	0,0011768	0,09961	10,04	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
2,8	230,04	0,0012088	0,0742	14,00	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
3,0	233,63	0,0012164	0,06663	15,01	1009,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
3,5	242,54	0,0012344	0,05706	17,53	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1249
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,933
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,744
11,0	318,04	0,0014886	0,01597	62,62	1450,2	2705,2	1255,0	3,4297	5,552
14,0	330,63	0,001611	0,01149	87,04	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,373
20,0	365,71	0,00203	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,928

Таблица 8 - Физические свойства воды

$P \cdot 10^{-4}$ , Па	T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	i, кДж/кг	C, кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
9,81	273	1000	0	4,23	55,1	1,31	1790	1,79	-0,63	13,7
9,81	283	1000	41,9	4,19	57,5	1,37	1310	1,31	0,70	9,52
9,81	293	998	83,8	4,19	59,9	1,43	1000	1,01	1,82	7,02
9,81	303	996	126	4,18	61,8	1,49	804	0,81	3,21	5,42
9,81	313	992	168	4,18	63,4	1,53	657	0,66	3,87	4,54
9,81	323	988	210	4,18	64,8	1,57	549	0,556	4,49	4,31
9,81	333	983	251	4,18	65,9	1,61	470	0,478	5,11	2,98
9,81	343	978	293	4,19	66,8	1,63	406	0,365	5,70	2,55
9,81	353	972	335	4,19	67,5	1,66	355	0,326	6,32	2,21
9,81	363	965	377	4,19	68,0	1,68	315	0,295	6,95	1,95
10,10	373	958	419	4,23	68,3	1,69	282	0,268	7,5	1,75
14,32	383	951	461	4,23	68,5	1,69	256	0,224	8,0	1,58
19,82	393	943	503	4,23	68,6	1,72	231	0,226	8,6	1,43
26,98	403	935	545	4,27	68,5	1,72	212	0,212	9,2	1,32
36,10	413	926	587	4,27	68,4	1,72	196	0,202	9,7	1,23
47,58	423	917	629	4,32	68,3	1,72	185	1,191	10,3	1,17
61,80	433	907	671	4,36	67,9	1,72	174	1,181	10,8	1,10
79,26	443	897	713	4,40	67,5	1,72	163	0,173	11,5	1,05
100,36	453	887	755	4,44		1,72	153		12,2	1,01

Таблица 9 - Физические свойства сухого воздуха

T, К	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\lambda \cdot 10^2$ , Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^6$ , Па·с	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
253	1,395	2,28	16,2	12,43	16,2	0,716
263	1,342	2,36	16,7	12,79	17,4	0,712
273	1,293	2,44	17,2	13,28	18,8	0,707
283	1,247	2,51	17,6	14,16	20,0	0,705
303	1,165	2,67	18,6	16,00	22,9	0,701
323	1,093	2,83	19,6	17,95	25,7	0,698
353	1,000	3,05	21,1	21,09	30,2	0,692