

**№ 3797**

**621.1  
Т 343**

# **ТЕПЛОТЕХНИКА**

**Методические указания**

**НОВОСИБИРСК  
2010**

# **ТЕПЛОТЕХНИКА**

Методические указания  
к выполнению расчетно-графической работы  
для студентов 2-3 курсов ФМА дневного отделения и ЗОТФ специальностей  
170600, 270300 (260601), 271200 (260501), 080401 и 260501

НОВОСИБИРСК  
2010

УДК 621.1(07)  
Т 343

Составители: канд. физ.-мат. наук М.С. Макаров  
канд. физ.-мат. наук М.А. Пахомов  
канд. тех. наук, доц. Э.В. Клещин

Рецензент д-р техн. наук, проф. Дьяченко Ю.В.

Работа подготовлена на кафедре технической теплофизики

© Новосибирский государственный  
технический университет, 2010

# 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

## 1.1. Система единиц измерения

В Российской Федерации в качестве стандарта представления физических величин принята международная система единиц – СИ (SI). Правила использования этой системы, русские наименования и обозначения, образования производных единиц измерения, разрешённые внесистемные единицы отражены в ГОСТ 8.417-2002.

В системе СИ за единицу длины принят метр ( $m$ ); за единицу массы – килограмм ( $kg$ ); за единицу времени – секунда ( $s$ ); за единицу количества вещества – моль ( $mol$ ); за единицу термодинамической температуры – градус Кельвина ( $K$ ); за единицу электрического тока – ампер ( $A$ ); за единицу силы света – кандела ( $cd$ ). В таблице 1 даны наиболее часто применяемые производные единицы и их размерности.

Таблица 1

| Наименование величин     | Буквенные обозначения | Размерности            |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|
| ускорение                | $a, g$                | $m / c^2$              |
| сила                     | $F$                   | $H = kg \cdot m / c^2$ |
| плотность                | $\rho$                | $kg / m^3$             |
| удельный объем           | $v$                   | $m^3 / kg$             |
| давление                 | $P$                   | $Pa = H / m^2$         |
| работа, теплота, энергия | $L, Q, E$             | $Дж = H \cdot m$       |
| мощность                 | $N$                   | $Вт = Дж / c$          |

Внесистемные единицы, применяемые в практике:

Давление

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ мм.рт.ст} = 133,322 \text{ Па}$$

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{см}^2 = 98000 \text{ Па}$$

$$1 \text{ ат (атмосфера техническая)} = 98100 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атм (атмосфера физическая)} = 760 \text{ мм.рт.ст} = 101325 \text{ Па}$$

Работа, теплота, энергия

$$1 \text{ ккал} = 4186,8 \text{ Дж}$$

$$1 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 9,81 \text{ Дж}$$

В термодинамических уравнениях используется абсолютное давление,  $Pa$  :  
 $p = p_{\text{бар}} + p_{\text{изб}}$ ;  $p = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}}$ , и абсолютная температура,  $K$  :  
 $T = t + 273,15$ , где  $p_{\text{бар}}$ ,  $p_{\text{изб}}$ ,  $p_{\text{вак}}$  – давления измеренные барометром, манометром и вакуумметром;  $t$  – температура в градусах Цельсия,  $^{\circ}C$ .

## 1.2. Уравнение состояния идеального газа

Идеальным газом называется такой газ, в котором отсутствуют силы межмолекулярных взаимодействий, а объемом молекул можно пренебречь. Большинство газов и газовых смесей хорошо описываются моделью идеального газа при низких давлениях (до  $10 \text{ ат}$ ).

В общем виде уравнение состояния идеального газа можно записать так:

$$pV = \frac{m}{\mu} \mathfrak{R}T, \quad (1)$$

где  $\mathfrak{R} = 8314,41 \text{ Дж} / (\text{кмоль} \cdot \text{град})$  – универсальная газовая постоянная;  $m$ ,  $\text{кг}$  – масса газа заключённая в объёме  $V$ ,  $\text{м}^3$  при абсолютном давлении  $p$ ,  $Pa$  и абсолютной температуре  $T$ ,  $K$ ;  $\mu$ ,  $\text{кг} / \text{кмоль}$  – молекулярный вес газа. Величину  $\mathfrak{R} / \mu$  называют газовой постоянной и обозначают  $R$ ,  $\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град})$ .

Уравнение (1) справедливо и для газовых смесей. В этом случае для расчёта параметров газовой смеси необходимо лишь знать значение молекулярного веса смеси, которое можно вычислить по формуле:

$$\mu = \left( \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\mu_i} \right)^{-1} = \sum_{i=1}^n X_i \mu_i, \quad (2)$$

где:  $K_i$ ,  $X_i$  – массовая и мольная (объёмная) концентрация  $i$ -ого компонента смеси.



После освоения разделов 1.1, 1.2 Вы можете приступить к выполнению типовой задачи № 1. Примеры решения задач можно найти в разделе 2, варианты заданий в разделе 3.

### 1.3. Внутренняя энергия, теплота, работа и первый закон термодинамики

Внутренняя энергия система включает в себя: кинетическую энергию поступательного, вращательного и колебательного движения частиц; потенциальную энергию взаимодействия частиц; энергию движения электронных оболочек атомов; внутриядерную энергию.

В большинстве теплоэнергетических процессов две последние составляющие остаются неизменными. Поэтому в этих процессах под внутренней энергией следует понимать энергию хаотического движения молекул и атомов, включающую энергию поступательного, вращательного и колебательного движений как молекулярного, так и внутримолекулярного, а также потенциальную энергию взаимодействия между молекулами.

Кинетическая энергия молекул является функцией температуры, значение потенциальной энергии зависит от среднего расстояния между молекулами и, следовательно, от занимаемого газом объема  $V$ , т.е. является функцией этой величины.

Внутренняя энергия  $U$  есть функция параметров состояния термодинамической системы. Величина  $u = U / m$  называется **удельной внутренней энергией** и представляет собой внутреннюю энергию единицы массы вещества.

Рассмотрим **закрытую термодинамическую систему**. При взаимодействии системы с окружающей средой, в ходе процесса ее состояние изменится; это изменение состояния вызовет изменение внутренней энергии, которое определяется разностью:

$$\Delta U = U_2 - U_1. \quad (3)$$

Если система находится в **абсолютно жесткой оболочке, но не является теплоизолированной**, то может происходить теплообмен с окружающей средой. Количество теплоты  $Q$ , полученное системой из окружающей среды, увеличит на такую же величину ее внутреннюю энергию:

$$\Delta U = Q. \quad (4)$$

В термодинамике принято теплоту, полученную системой, считать положительной, а отдаваемую – отрицательной.

Если система находится в **свободно расширяющейся теплоизолированной** оболочке, то вследствие увеличения объема система воздействует на окружающую среду, преодолевая внешнее давление, или, наоборот, уменьшает свой объем под влиянием внешнего давления. При расширении системы ею производится работа вследствие убыли внутренней энергии системы, а при сжатии работа внешних сил идет на увеличение внутренней энергии системы:

$$\Delta U = -L. \quad (5)$$

Принято работу, производимую системой, считать положительной, а работу, расходуемую окружающей средой на сжатие системы, – отрицательной.

Если в процессе взаимодействия системы и окружающей среды **возможна передача энергии, как в виде теплоты, так и в виде механической работы**, то уравнение происходящего процесса имеет вид:

$$\Delta U = Q - L. \quad (6)$$

**Уравнение первого закона термодинамики** выражает те изменения, которые вызываются в термодинамической системе при подводе к ней некоторого количества энергии.

Если системе массой  $m$  сообщить некоторое количество теплоты  $dQ$ , то это приведёт к изменению её температуры и объема. При этом изменится внутренняя энергия системы  $dU$ , и газ совершит работу против внешних сил  $dL$ .

Запишем дифференциальное уравнение баланса энергии:

$$dQ = dU + dL \quad (7)$$

или на единицу массы  $mdq = mdu + mdl$  и с учётом  $dl = pdv$ :

$$\boxed{dq = du + p \cdot dv}. \quad (8)$$

В термодинамических процессах, происходящих при постоянном давлении, вместо внутренней энергии принято использовать энтальпию (тепловую функцию) системы. **Удельная энтальпия системы**  $h = u + pv$  представляет собой энтальпию системы, содержащейся в одном килограмме вещества, и измеряется в  $Дж/кг$ . Энтальпия, также как и внутренняя энергия, есть функция состояния системы. Изменение энтальпии в любом

процессе определяется только начальным и конечным состояниями и не зависит от характера процесса.

Первый закон термодинамики можно записать через удельную энтальпию системы следующим образом:

$$\boxed{dq = dh - v \cdot dp} . \quad (9)$$

#### 1.4. Теплоемкость термодинамической системы, показатель адиабаты

Если выразить удельную внутреннюю энергию  $u$  в виде функции удельного объема  $v$  и температуры  $T$ , то можно записать:

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv . \quad (10)$$

Следует отметить, что выражение (10) справедливо как для идеального, так и для реального газа. Если рассматривать **идеальный газ**, то можно показать, что удельная внутренняя энергия такого газа зависит только от температуры:

$$\left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_p = \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0 . \quad (11)$$

Уравнение (10) в этом случае можно переписать в виде:

$$\frac{du}{dT} = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v . \quad (12)$$

В соответствии с **первым законом термодинамики** для закрытых систем, в которых протекают равновесные процессы:

$$dq = du + pdv , \quad (13)$$

или с учетом соотношения (10):

$$dq = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_T + p \right] dv . \quad (14)$$

Для изохорного процесса (идущего при постоянном объёме) уравнение (14) принимает вид:

$$dq_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT , \text{ или } \left( \frac{dq}{dT} \right)_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v = c_v . \quad (15)$$

Здесь  $c_v$  есть **удельная массовая теплоемкость термодинамической системы (газа) при постоянном объеме**, которая характеризует темп роста внутренней энергии в изохорном процессе с увеличением температуры и имеет размерность  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ . С учётом (12) для идеального газа можно записать:

$$c_v = \frac{du}{dT}. \quad (16)$$

Для изобарного процесса (идущего при постоянном давлении) из уравнения (14) с учетом того, что **удельная массовая теплоемкость термодинамической системы (газа) при постоянном давлении** выражается формулой  $c_p = (dq/dT)_p$ , получим:

$$c_p = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] \left(\frac{dv}{dT}\right)_p = c_v + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T + p\right] \left(\frac{dv}{dT}\right)_p. \quad (17)$$

При постоянном давлении из уравнения состояния идеального газа после дифференцирования левой и правой частей следует:

$$p dv = R dT, \text{ или } R = p \left(\frac{dv}{dT}\right)_p. \quad (18)$$

Поскольку для идеального газа  $(\partial u / \partial v)_T = 0$ , из уравнений (17) и (18) получим:

$$\boxed{c_p - c_v = R}. \quad (19)$$

Соотношение (19) называют уравнением Майера.

**Показатель адиабаты**  $k = c_p / c_v$  – величина, не зависящая от температуры газа. Определяется числом степеней свободы молекул, составляющих газ, или, в общем виде, газовую смесь. Для одноатомного газа  $k = 1,67$ , для двухатомного  $k = 1,40$ , для трехатомного и многоатомных газов  $k = 1,33$ .

## 1.5. Политропный процесс

Уравнения первого закона термодинамики для закрытой термодинамической системы характеризуют распределение подведенной к газу (или отведенной) теплоты между его внутренней энергией и

совершенной им работой. В термодинамике изучаются процессы, при протекании которых подводимая теплота распределяется между внутренней энергией газа и работой, которую он совершает, в постоянной пропорции.

Рассмотрим процесс, в котором на изменение внутренней энергии газа расходуется  $\varphi$ -ая часть подводимой теплоты  $du = \varphi dq$ . Такие процессы называются **политропными** (греч. многообразными). Соотношения будем записывать для 1 кг идеального газа. Уравнение первого закона термодинамики запишется следующим образом:

$$dl = (1 - \varphi) dq . \quad (20)$$

Значение  $\varphi$  в политропных процессах могут быть от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Теплота всегда может быть выражена произведением теплоемкости на изменение температуры. Для любого политропного процесса также можно написать:

$$dq = c_\varphi dT , \quad (21)$$

где  $c_\varphi$  – теплоемкость политропного процесса. Для идеального газа  $c_\varphi = c_v / \varphi$ .

В политропном процессе идеального газа изменения параметров могут быть выражены определенными зависимостями. Подставляя (21) в уравнение первого закона термодинамики (20) и выражая  $dT$  через  $dv$  и  $dp$  из уравнения состояния, получим следующее соотношение:

$$n \frac{dv}{v} + \frac{dp}{p} = 0 , \quad (22)$$

где:  $n = (c_\varphi - c_p) / (c_\varphi - c_v) = const$  – показатель политропы. Проведём интегрирование выражения (22):

$$n \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} \Rightarrow p_1 v_1^n = p_2 v_2^n . \quad (23)$$

Таким образом, для политропного процесса всегда выполняется условие:

$$\boxed{pv^n = const} . \quad (24)$$

Выражение для работы политропного процесса может быть получено из основного интеграла работы:

$$l = \int_1^2 p dv = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}. \quad (25)$$

Количество подводимой теплоты в ходе политропного процесса может быть легко определено исходя из теплоёмкости политропного процесса:

$$q = c_\varphi dT = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1). \quad (26)$$

Политропный процесс имеет обобщающее значение, поскольку охватывает всю совокупность основных термодинамических процессов (см. таблицу 2).

Таблица 2

| Термодинамический процесс | Значение показателя политропы $n$ | Теплоёмкость процесса $c_\varphi$ |
|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Изохорный                 | $\infty$                          | $c_v$                             |
| Изобарный                 | 0                                 | $c_p$                             |
| Изотермический            | 1                                 | $+\infty$                         |
| Адиабатный                | $k = c_p / c_v$                   | 0                                 |

### 1.6. Адиабатный термодинамический процесс

Термодинамический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой  $dq = 0$ , называется адиабатным. Исходя из общих соотношений для политропного процесса, для адиабатного процесса можно получить следующие зависимости.

Уравнение адиабаты:

$$pv^k = const. \quad (27)$$

Основные соотношения, связывающие параметры газа при адиабатном процессе:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k.$$

Используя уравнение состояния идеального газа, можно перейти к записи данного условия через температуру и удельный объём газа:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$

или через давление и температуру:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (28)$$

Удельная работа расширения при адиабатном процессе согласно первому закону термодинамики совершается за счет уменьшения внутренней энергии и может быть вычислена:

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



После освоения разделов 1.3 - 1.6 Вы можете приступить к выполнению типовых задач № 2 и 3.

## 1.7. Процесс парообразования (p-v – диаграмма водяного пара)

Водяной пар получил широкое распространение в технике в качестве теплоносителя или рабочего тела парокompрессионных установок. Методический материал, представленный ниже, описывает термодинамические процессы для водяного пара, однако получаемые соотношения могут быть использованы и при анализе поведения паров других жидкостей.

Рассмотрим подробно представленную на рисунке p-v диаграмму состояния водяного пара.

Точка (a). Вода при атмосферном давлении  $p_0$  имеет удельный объём  $v_0'$  и находится при температуре  $0^\circ\text{C}$ . Точка (b). Тот же объём воды при давлении выше атмосферного  $p_1$  при большей температуре. Точка (K) – критическая точка (для воды критическая температура  $t_{кр} = 374,15^\circ\text{C}$ , критическое давление  $p_{кр} = 22,1048 \text{ МПа}$ , критический удельный объём  $v_{кр} = 0,0031 \text{ м}^3 / \text{кг}$ ).



$$q_3 = \overline{c_p}''(t_1 - t''). \quad (31)$$

В формулах (29) - (31) приняты следующие обозначения:  $\overline{c_p}'$  – средняя удельная теплоемкость жидкости для диапазона температур от  $t_0$  до  $t'$ , *Дж / (кг · град)*;  $r$  – удельная теплота парообразования жидкости при данной температуре кипения  $t'$ , *Дж / кг*;  $h'$  и  $h''$  – удельные энтальпии кипящей жидкости и сухого насыщенного пара при данной температуре кипения  $t'$  и  $t''$ , соответственно, *Дж / кг*;  $\overline{c_p}''$  – средняя удельная теплоемкость сухого пара для диапазона температур от  $t''$  до  $t_1$ , *Дж / (кг · град)*.



После освоения раздела 1.7 Вы можете приступить к выполнению типовой задачи № 4.

## 1.8. Передача теплоты через плоскую стенку в стационарных условиях

Тепловой поток через однородную плоскую стенку при стационарном режиме теплообмена (т.е. при постоянном по времени распределении температуры внутри плоской стенки) определяется соотношением:

$$Q = q \cdot F_{CT} = \frac{T_{cm1} - T_{cm2}}{R_\lambda}, \quad (32)$$

где:  $T_{cm1}, T_{cm2}$  – температуры на поверхностях стенки,  $^{\circ}C$ ;  $R_\lambda = \delta / (\lambda \cdot F_{CT})$  – термическое сопротивление стенки с учётом площади её поверхности, *град / Вт*;  $\delta$  – толщина стенки, *м*;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности стенки, *Вт / (м · град)*;  $q$  – удельный тепловой поток на единицу площади стенки, *Вт / м<sup>2</sup>*.

Для многослойной плоской стенки без учета термических сопротивлений контакта тепловой поток при стационарном режиме будет определяться соотношением:

$$Q = q \cdot F_{CT} = \frac{T_{cm1} - T_{cm2}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}}, \quad (33)$$

где:  $R_{\lambda i} = \delta_i / (\lambda_i \cdot F_{CT})$  – термическое сопротивление  $i$ -ой стенки,  $град / Вт$ ;  $n$  – количество слоёв, составляющих стенку.

При конвективном охлаждении поверхностей стенки часто используют оребрение для увеличения теплоотдачи от поверхности стенки к жидкому или газообразному теплоносителю. Если пренебречь термическим сопротивлением рёбер (можно считать рёбра бесконечно тонкими или бесконечно теплопроводными), то при известных коэффициентах теплоотдачи с обеих сторон стенки тепловой поток можно рассчитать по формуле:

$$Q = q \cdot F_{CT} = \frac{T_{ж1} - T_{ж2}}{\frac{1}{\alpha_1 F_1} + \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} + \frac{1}{\alpha_2 F_2}}, \quad (34)$$

где:  $\alpha_1, F_1$  и  $\alpha_2, F_2$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт / (м^2 град)$  и площадь поверхности,  $м^2$  со стороны внешнего и внутреннего слоёв многослойной стенки соответственно;  $F_{CT}$  – площадь внутренних слоёв стенки без оребрения;  $T_{ж1}, T_{ж2}$  – температуры жидкого или газообразного теплоносителя со стороны внешнего и внутреннего слоёв соответственно.



После освоения раздела 1.8 Вы можете приступить к выполнению типовой задачи № 5 и 6.

## 1.9. Теплообмен при свободной и вынужденной конвекции

Явление конвективного переноса теплоты наблюдается лишь в жидкостях и газах. Конвективный перенос – это распространение теплоты, обусловленное перемещением макроскопических элементов среды. Объемы жидкости или газа, перемещаясь из области с большей температурой в область с меньшей температурой, переносят с собой теплоту. В реальных условиях конвективный теплообмен всегда сопровождается теплопроводностью, а иногда и лучистым теплообменом. Процесс теплообмена между поверхностью твердого тела и жидкостью называется **конвективной теплоотдачей**, а поверхность тела, через которую переносится теплота – **поверхностью теплообмена**.

Конвективный перенос может осуществляться в результате свободного или вынужденного движения жидкости или газа.

**Свободное движение** (свободная конвекция) возникает тогда, когда частицы жидкости в различных участках системы находятся под воздействием массовых сил различной величины. Например, отопительная батарея подогревает соприкасающийся с ней воздух путем теплопроводности. Плотность подогретого воздуха меньше плотности окружающей среды – подогретый воздух поднимается вверх, а на его место приходит холодный воздух.

**Вынужденное движение** (вынужденная конвекция) происходит под действием внешних сил. Разность давлений, под действием которой перемещается теплоноситель, создается с помощью насосов, эжекторов и других устройств.

Согласно закону Ньютона - Рихмана тепловой поток при теплоотдаче пропорционален площади поверхности  $F$  и перепаду температур между ядром жидкой среды (на большом удалении поверхности теплообмена)  $t_{ж}$  и самой поверхностью  $t_{cm}$  :

$$Q = \alpha \cdot F (t_{cm} - t_{ж}) \quad (35)$$

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$  в уравнении (35) называется коэффициентом теплоотдачи. Он характеризует интенсивность теплоотдачи. Численное значение его равно тепловому потоку от единичной поверхности теплообмена при разности температур поверхности и жидкости в один градус.

В теплотехнике принято связь искомых величин, таких как коэффициент теплоотдачи, коэффициент трения, тепловой поток и др. с параметрами течения – скоростью потока, вязкость, теплопроводность и др. выражать в виде так называемых **уравнений подобия**. Членами данных уравнений являются **числа подобия**, представляющие собой безразмерные комплексы, характеризующие тот или иной процесс. Так, например, интенсивность теплоотдачи может быть выражена **числом Нуссельта**:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (36)$$

где:  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности,  $Вт/(м^2 \cdot град)$ ;  $L$  – характерный размер поверхности (длина пластины, диаметр трубы и др.),  $м$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости,  $Вт/(м \cdot град)$ . Из определения числа Нуссельта (36) видно, что это число характеризует отношение интенсивности теплоотдачи за счёт конвекции к интенсивности теплоотдачи за счёт теплопроводности.

При свободноконвективном движении теплоносителя над вертикально или горизонтально расположенной поверхностью в неограниченном пространстве интенсивность теплоотдачи определяется из уравнения подобия:

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^m. \quad (37)$$

**Число Грасгофа** определяет интенсивность свободноконвективного движения:

$$Gr = \frac{g\beta(t_{cm} - t_{ж})L^3}{\nu^2}. \quad (38)$$

Число Грасгофа характеризует отношение подъемной силы, возникающей вследствие теплового расширения жидкости, к силам вязкостного трения. Здесь:  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения,  $1/K$  (для идеальных газов  $\beta = 1/T_{cp}$ ,  $T_{cp}$  – определяющая температура,  $K$ );  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $m^2/c$ .

**Число Прандтля** отражает влияние свойств газа или жидкости на теплообмен.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \quad (39)$$

$\mu = \rho \cdot \nu$  – коэффициент динамической вязкости жидкости,  $кг/(м \cdot с)$ ;  $c_p$  – теплоёмкость жидкости (газа) при постоянном давлении,  $Дж/(кг \cdot град)$ .

Значения величин  $c$  и  $m$  в уравнении (37) зависят от произведения чисел  $Gr \cdot Pr = Ra$  – это произведение часто называют **числом Рейля**:

Таблица 3

| $Gr \cdot Pr$                     | $c$   | $m$ |
|-----------------------------------|-------|-----|
| $10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$      | 1,18  | 1/8 |
| $5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$ | 0,54  | 1/4 |
| $2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$      | 0,135 | 1/3 |

За определяющую температуру (температуру по которой определяют свойства жидкости или газа) здесь принята **средняя температура**

**пристенного слоя жидкости.** Определяющий размер зависит от формы и расположения поверхности теплообмена: для труб и шаров за определяющий размер  $L$  следует принимать их **диаметр**, для вертикальных поверхностей – их **высоту**, для горизонтальных плоских поверхностей – **наименьший горизонтальный размер**.

При движении теплоносителя под действием внешних сил (**вынужденная конвекция**) интенсивность теплоотдачи определяется из уравнения подобия:

$$Nu = a Re^n Pr^m. \quad (40)$$

**Число Рейнольдса** отражает интенсивность вынужденного движения газа или жидкости и представляет отношение сил инерции (скоростного напора) к силам вязкостного трения.

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu}, \quad (41)$$

$u$  – скорость вынужденного движения теплоносителя,  $m/c$ .

По значению числа Рейнольдса можно судить о режиме течения теплоносителя. В частности, при течении теплоносителя вдоль плоской поверхности критическое число Рейнольдса равно  $2 \cdot 10^5$ .

$$\begin{aligned} Re = \rho u L / \mu \leq 2 \cdot 10^5 & - \text{ламинарный режим} \\ Re > 2 \cdot 10^5 & - \text{турбулентный режим} \end{aligned} \quad (42)$$

Число Рейнольдса построено по скорости набегающего потока  $u$  и длине пластины  $L$ . Значения величин  $a$ ,  $n$  и  $m$  в уравнении (40) при течении вдоль плоской пластины зависят от граничных условий, режима течения и значения числа Рейнольдса. При числах Рейнольдса меньше чем  $10^7$  значения констант представлены в таблице 4.

Таблица 4

| константа | граничные условия I рода<br>(постоянная температура<br>стенки) |                       | граничные условия II рода<br>(постоянная интенсивность<br>теплого потока) |                       |
|-----------|--|-----------------------|---|-----------------------|
|           | ламинарный<br>режим  | турбулентный<br>режим | ламинарный<br>режим   | турбулентный<br>режим |
| $a$       | 0,332  | 0,0296                | 0,47  | 0,0306                |
| $n$       | 0,5  | 0,8                   | 0,5   | 0,8                   |
| $m$       | 1/3  | 0,4-0,43              | 1/3   | 0,4-0,43              |

При течении в трубах и каналах критическое число Рейнольдса, при котором происходит ламинарно-турбулентный переход, равно 2300 .

$$\begin{aligned} \text{Re} = \rho u_{cp} D / \mu \leq 2300 & - \text{ламинарный режим} \\ 2300 < \text{Re} \leq 3000 & - \text{переходный режим} \\ \text{Re} > 3000 & - \text{турбулентный режим} \end{aligned} \quad (43)$$

Здесь число Рейнольдса построено по среднерасходной скорости потока  $u_{cp}$  и по диаметру канала  $D$  . Значения величин  $a$  ,  $n$  и  $m$  в уравнении (40) для случая развитого течения в круглой гладкой трубе приведены таблице 5.

Таблица 5

| константа | ламинарный режим         |                           | турбулентный режим при любых граничных условиях |
|-----------|--------------------------|---------------------------|---|
|           | граничные условия I рода | граничные условия II рода |   |
| $a$       | 3,66                     | 4,36                      | 0,021   |
| $n$       | 0                        | 0                         | 0,8   |
| $m$       | 0                        | 0                         | 0,43  |



После освоения раздела 1.9 Вы можете приступить к выполнению типовой задачи № 7 и 8.

## 2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

### 2.1. Типовая задача № 1

В баллоне объемом  $1 \text{ м}^3$  находится сжатый газообразный азот. Начальная температура азота  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление по манометру  $20 \text{ бар}$ . В процессе нагрева азота его температура увеличивается до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить массу азота и его давление после нагрева, если атмосферное давление  $760 \text{ мм.рт.ст.}$ . Молекулярный вес азота равен  $28 \text{ кг / кмоль}$ .

#### Решение

Газ : азот

$$V = 1 \text{ м}^3$$

$$T_1 = 15 + 273,15 = 288,15 \text{ К}$$

$$T_2 = 80 + 273,15 = 353,15 \text{ К}$$

$$p_{1\text{изб}} = 20 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$p_{\text{бар}} = 760 \cdot 133,322 = 101325 \text{ Па}$$

$$\mu_{\text{азот}} = 28 \text{ кг / кмоль}$$

---

$$p_{2\text{изб}} = ? \quad m = ?$$

Из уравнения состояния следует, что масса газа в баллоне равна:

$$m = \frac{p_1 V \mu_{\text{азот}}}{R T_1}.$$

Начальное абсолютное давление в баллоне:

$$p_1 = p_{1\text{изб}} + p_{\text{бар}} = (20 + 1,013) \cdot 10^5 = 21,013 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Используя исходные данные, получим:

$$m = \frac{21,013 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 28}{8314,41 \cdot 288,15} = 24,56 \text{ кг}.$$

Так как газ изолирован от внешней среды, то его масса в баллоне в процессе нагрева не меняется. Из уравнения состояния следует, что абсолютное давление газа после нагрева можно рассчитать по формуле:

$$p_2 = \frac{m R T_2}{V \mu_{\text{азот}}} = \frac{24,56 \cdot 8314,41 \cdot 353,15}{1 \cdot 28} = 25,754 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Манометр в этом случае будет показывать:

$$p_{2\text{изб}} = p_2 - p_{\text{бар}} = (25,754 - 1,013) \cdot 10^5 = 24,741 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$p_{2\text{изб}} = 24,741 \text{ бара}.$$

Ответ:  $p_{2\text{изб}} = 24,741 \text{ бара}$ ,  $m = 24,56 \text{ кг}$ .

## 2.2. Типовая задача № 2

Рассчитать изменение удельной внутренней энергии  $\Delta u_{1-2}$  и удельной энтальпии  $\Delta h_{1-2}$  воздуха в адиабатном термодинамическом процессе 1-2. Начальные параметры воздуха: давление 40 бар, температура 80 °C; конечное давление 0,1 бар. Воздух считать идеальным газом, газовая постоянная 287 Дж/(кг·град), удельная теплоемкость при постоянном давлении 1 кДж/(кг·град), показатель адиабаты  $k = 1,4$ .

### Решение

Газ : воздух;  $k_{\text{воздух}} = 1,4$

$$p_1 = 40 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_1 = 80 + 273,15 = 353,15 \text{ К}$$

$$p_2 = 0,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$R_{\text{воздух}} = 287 \text{ Дж} / \text{кг} / \text{град}$$

$$c_{p, \text{воздух}} = 1000 \text{ Дж} / \text{кг} / \text{град}$$

$$\Delta u_{1-2} = ?, \quad \Delta h_{1-2} = ?$$

Из уравнения состояния идеального газа можно рассчитать удельный объём воздуха в начале процесса:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 353,15}{40 \cdot 10^5} = 0,0253 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Из основных соотношений для адиабатного процесса следует, что:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,0253 \left( \frac{40}{0,1} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,78 \text{ м}^3 / \text{кг} .$$

Из уравнения состояния идеального газа можно рассчитать температуру воздуха в конце процесса:

$$T_2 = \frac{v_2 p_2}{R} = \frac{1,78 \cdot 0,1 \cdot 10^5}{287} = 62 \text{ К} .$$

Из уравнения Майера получим значение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном объёме:

$$c_v = c_p - R = 1000 - 287 = 713 \text{ Дж} / \text{кг} / \text{град} .$$

Известно, что для идеального газа  $du = c_v dT$ , а  $dh = c_p dT$  отсюда:

$$\Delta u_{1-2} = c_v (T_2 - T_1) = 713 \cdot (62 - 353,15) = -207 \text{ кДж} / \text{кг};$$

$$\Delta h_{1-2} = c_p (T_2 - T_1) = 1000 \cdot (62 - 353,15) = -291 \text{ кДж} / \text{кг} .$$

Ответ:  $\Delta u_{1-2} = -207 \text{ кДж} / \text{кг}$ ,  $\Delta h_{1-2} = c_p (T_2 - T_1) = -291 \text{ кДж} / \text{кг}$  .

### 2.3. Типовая задача № 3

1 кг воздуха сжимается в компрессоре по политропному процессу с показателем политропы  $n=2$  от начальных параметров: давление 0,1 МПа и температуры 20 °С до конечного давления 7 МПа. Определить удельную работу сжатия и удельную теплоту процесса при  $R=287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$  и  $c_p=1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ .

#### Решение

$$\begin{aligned} \text{Газ : воздух} \\ m = 1 \text{ кг} \\ n = 2 \\ p_1 = 0,1 \cdot 10^6 = 10^5 \text{ Па} \\ T_1 = 20 + 273,15 = 293,15 \text{ К} \\ p_2 = 70 \cdot 10^5 \text{ Па} \\ R_{\text{воздух}} = 287 \text{ Дж}/\text{кг}/\text{град} \\ c_p_{\text{воздух}} = 1000 \text{ Дж}/\text{кг}/\text{град} \\ l = ?, q = ? \end{aligned}$$

Для политропного процесса работа может быть рассчитана по формуле:

$$l = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-n}, \text{ а теплота по формуле:}$$

$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1).$$

Определим удельный объём газа в начале процесса по уравнению состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 293,15}{10^5} = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Определим удельный объём газа в конце процесса по основному свойству политропного процесса:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 0,84 \left( \frac{1}{70} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

С учётом рассчитанных величин, получим:

$$l = \frac{p_2 v_2 - p_1 v_1}{1-n} = \frac{70 \cdot 0,1 - 1 \cdot 0,84}{1-2} 10^5 = -616 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Из уравнения Майера получим значение удельной теплоёмкости воздуха при постоянном объёме:

$$c_v = c_p - R = 1000 - 287 = 713 \text{ Дж}/\text{кг}/\text{град}.$$

Показатель адиабаты воздуха равен:

$$k = \frac{c_p}{c_v} = \frac{1000}{713} = 1,4.$$

Определим температуру газа в конце процесса по уравнению состояния:

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{70 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{287} = 2439 \text{ К}.$$

$$q = 713 \frac{2-1,4}{2-1} (2439 - 293,15) = 918 \text{ кДж / кг} .$$

Ответ:  $l = -616 \text{ кДж / кг}$ ,  $q = 918 \text{ кДж / кг}$  .

**Примечание.** При  $n = 1$  (изотермический процесс) расчет необходимо вести по следующим соотношениям:

$$l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} .$$

Так как температура в рассматриваемом процессе не меняется, то внутренняя энергия остается постоянной (т.е.  $u = const$ ,  $du = 0$ ). Тогда в соответствии с первым законом термодинамики  $q = l$ , т.е. вся подводимая теплота полностью превращается в работу расширения. При изотермическом же сжатии от газа отводится теплота в количестве, равном затраченной на сжатие работе.

#### 2.4. Типовая задача № 4

Определить количество теплоты, необходимой для превращения 1 кг воды с температурой  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  в перегретый пар с температурой  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  в изобарном процессе с давлением  $0,1 \text{ МПа}$  .

#### Решение

|   |   |
|---|---|
| <p><i>Жидкость</i> : вода</p> <p><math>m = 1 \text{ кг}</math></p> <p><math>p = 0,1 \cdot 10^6 = 10^5 \text{ Па}</math></p> <p><math>t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> <p><math>t_1 = 110 \text{ }^\circ\text{C}</math></p> <hr style="border: 0.5px solid black;"/> <p><math>Q = ?</math></p> | <p>Удельное количество теплоты, необходимое для нагрева, испарения и перегрева воды будет равно:</p> <p><math>q = q_1 + q_2 + q_3</math> .</p> <p>Для воды температура кипящей жидкости <math>t'</math> и температура насыщенного сухого пара <math>t''</math> равны. Обозначим их температурой кипения <math>t_n = t' = t''</math> .</p> |
|---|---|

Тогда:  $q = \overline{c_p}'(t_n - t_0) + r(t_n) + \overline{c_p}''(t_1 - t_n)$  .

По свойствам воды и водяного пара по заданному давлению определим температуру кипения воды:  $t_n = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  .

Средняя удельная теплоемкость жидкости для диапазона температур от  $20$  до  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  будет равна:

$$\overline{c_p}' = (c_p'(20) + c_p'(100)) / 2 = (4,183 + 4,220) \cdot 10^3 / 2 = 4201,5 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Удельная теплота парообразования жидкости при  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  равна:  
 $r = 2256,7 \text{ кДж} / \text{кг}.$

Средняя удельная теплоемкость сухого пара для диапазона температур от  $100$  до  $110 \text{ }^\circ\text{C}$  будет равна:

$$\overline{c_p}'' = (c_p''(100) + c_p''(110)) / 2 = (1,889 + 1,894) \cdot 10^3 / 2 = 1891,5 \text{ Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град}).$$

Тогда на  $1 \text{ кг}$  воды необходимо затратить тепла:

$$q = \overline{c_p}'(100 - 20) + r(100) + \overline{c_p}''(110 - 100) = 4201,5 \cdot 80 + 2256700 + 1891,5 \cdot 10 = 2611,7 \text{ кДж} / \text{кг}.$$

$$Q = m \cdot q = 1 \cdot 2611,7 = 2611,7 \text{ кДж}.$$

Ответ:  $Q = 2611,7 \text{ кДж}.$

**Примечание.** Теплофизические характеристики воды и водяного пара приведены в приложении. Отметим, что  $t_n = t' = t'' = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  для воды только при  $p = 10^5 \text{ Па}.$

## 2.5. Типовая задача № 5

Определить плотность теплового потока и рассчитать поле температур в плоской трехслойной стенке, состоящей из слоя штукатурки толщиной  $3 \text{ см}$ , кирпича толщиной  $12 \text{ см}$  и дерева толщиной  $6 \text{ см}$ , если температура наружной поверхности штукатурки  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ , а внутренней поверхности дерева  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Принять коэффициенты теплопроводности штукатурки, кирпича и дерева равными  $0,78 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$ ,  $0,25 \text{ (Вт} / \text{м} \cdot \text{град)}$  и  $0,1 \text{ (Вт} / \text{м} \cdot \text{град)}$  соответственно. Построить график изменения температуры по толщине стенки.

## Решение

$$\delta_{ш} = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м}$$

$$\delta_{к} = 12 \text{ см} = 0,12 \text{ м}$$

$$\delta_{д} = 6 \text{ см} = 0,06 \text{ м}$$

$$t_{cm1} = -40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$t_{cm2} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{ш} = 0,78 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$$

$$\lambda_{к} = 0,25 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$$

$$\lambda_{д} = 0,10 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$$

$$q = ?, T = f(\delta) = ?$$

Удельный тепловой поток через многослойную стенку без учёта контактных сопротивлений можно определить по формуле:

$$q = \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{R_{\lambda ш} + R_{\lambda к} + R_{\lambda д}}.$$

Определим термические сопротивления слоёв и стенки в целом:

$$R_{\lambda ш} = \frac{\delta_{ш}}{\lambda_{ш}} = \frac{3 \cdot 10^{-2}}{0,78} = 0,0385 \text{ м}^2 \cdot \text{град} / \text{Вт};$$

$$R_{\lambda к} = \frac{\delta_{к}}{\lambda_{к}} = \frac{12 \cdot 10^{-2}}{0,25} = 0,4800 \text{ м}^2 \cdot \text{град} / \text{Вт};$$

$$R_{\lambda д} = \frac{\delta_{д}}{\lambda_{д}} = \frac{6 \cdot 10^{-2}}{0,10} = 0,6000 \text{ м}^2 \cdot \text{град} / \text{Вт};$$

$$R = R_{\lambda ш} + R_{\lambda к} + R_{\lambda д} = 0,0385 + 0,4800 + 0,6000 = 1,1185 \text{ м}^2 \cdot \text{град} / \text{Вт}.$$

Удельный тепловой поток при этом будет равен:

$$q = \frac{t_{cm2} - t_{cm1}}{R} = \frac{20 + 40}{1,1185} = 53,64 \text{ Вт} / \text{м}^2.$$

Определим температуры внутри стенки между слоями.

Температура стенки между слоями дерева и кирпича может быть найдена по формуле для однослойной стенки:

$$t_{cmдк} = t_{cm2} - q \cdot R_{\lambda д} = 20 - 53,64 \cdot 0,6 = -12,18 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Аналогично температуру стенки под слоем штукатурки определяем по формуле:

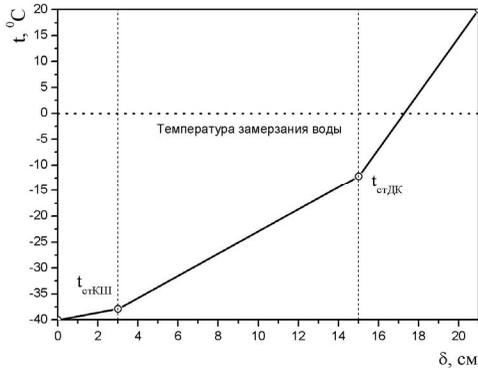
$$t_{cmкш} = t_{cmдк} - q \cdot R_{\lambda к} = -12,18 - 53,64 \cdot 0,48 = -37,92 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Для проверки определим температуру внешнего слоя штукатурки:

$$(t_{cm1})_{\text{прог}} = t_{cmкш} - q \cdot R_{\lambda ш} = -37,92 - 53,64 \cdot 0,0385 = -39,98 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

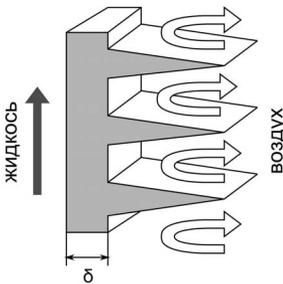
С точностью до сотых долей градуса полученная температура соответствует заданной температуре  $t_{cm1}$ .

Графически распределение температуры внутри стенки можно представить в виде трёх прямых отрезков.



Ответ:  $q = 53,64 \text{ Вт} / \text{м}^2$ .

## 2.6. Типовая задача № 6



Определить тепловой поток, передаваемый через  $1 \text{ м}^2$  ребрѐнной алюминиевой стенки, если со стороны ребрѐния стенка омывается воздухом с температурой  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , а со стороны плоской поверхности жидкостью с температурой  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Площадь поверхности стенки между ребрами  $0,5 \text{ м}^2$ , площадь поверхности ребер  $10 \text{ м}^2$ , толщина стенки  $9 \text{ мм}$ , коэффициент теплоотдачи со стороны ребрѐнной поверхности равен  $11,3 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ , со стороны плоской поверхности  $291 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$ , коэффициент теплопроводности алюминия  $203,5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$ . Определить во сколько раз ребрѐние увеличивает тепловой поток, передаваемый через стенку.

## Решение

$$F_{CT} = 1 \text{ м}^2$$

$$F_{MP} = 0,5 \text{ м}^2$$

$$F_P = 10 \text{ м}^2$$

$$\delta = 9 \text{ мм} = 0,009 \text{ м}$$

$$t_{Ж} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_B = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{CT} = 203,5 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$$

$$\alpha_{Ж} = 291 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$$

$$\alpha_B = 11,3 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град})$$

$$Q_{орреб} = ?, Q_{орреб} / Q_{без\ реб} = ?$$

Определим тепловой поток через стенку без орребрения по формуле:

$$Q_{без\ реб} = q \cdot F_{CT} = \frac{t_{Ж} - t_B}{\frac{1}{\alpha_{Ж}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_B}} \cdot F_{CT} =$$
$$= \frac{90 - 20}{\frac{1}{291} + \frac{0,009}{203,5} + \frac{1}{11,3}} \cdot 1 = 761 \text{ Вт}.$$

С учётом орребрения тепловой поток можно определить из следующего соотношения:

$$Q_{орреб} = q \cdot F_{CT} =$$
$$= \frac{t_{Ж} - t_B}{\frac{1}{\alpha_{Ж} F_{CT}} + \frac{\delta}{\lambda F_{CT}} + \frac{1}{\alpha_B (F_{MP} + F_P)}} =$$

$$= \frac{90 - 20}{\frac{1}{291 \cdot 1} + \frac{0,009}{203,5 \cdot 1} + \frac{1}{11,3 \cdot (0,5 + 10)}} = 5878 \text{ Вт}.$$

Эффективность орребрения определяется отношением полученных тепловых потоков:

$Q_{орреб} / Q_{без\ реб} = 5878 / 761 = 7,72$ , т.е. орребрение увеличивает теплосъём с нагретой поверхности более, чем в семь раз.

Ответ:  $Q_{орреб} = 5878 \text{ Вт}$ ,  $Q_{орреб} / Q_{без\ реб} = 7,72$ .

## 2.7. Типовая задача № 7

Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, отдаваемый вертикальной стенкой высотой 2 м и шириной 3 м воздуху, если средняя температура стенки  $120^\circ\text{C}$ , а температура воздуха вдали от нее  $20^\circ\text{C}$ .

## Решение

|  |   |
|--|---|
| <i>Теплоноситель :</i><br><i>воздух.</i> | Вдоль нагретой вертикальной стенки развивается свободное движение воздуха под действием силы тяжести. В этом случае связь числа Нуссельта, определяющего интенсивность теплоотдачи, с параметрами течения можно записать в виде:<br>$Nu = c(Gr \cdot Pr)^m .$ Выпишем значения свойств воздуха, необходимые для расчёта чисел подобия, при определяющей температуре (см. приложения):<br>$t_{cp} = (t_{cm} + t_B) / 2 = (20 + 120) / 2 = 70^{\circ}C,$ $T_{cp} = 343,15 \text{ К}.$ |
| <i>Вертикальная стенка.</i>              |   |
| $L = 2 \text{ м}$                        |   |
| $b = 3 \text{ м}$                        |   |
| $t_B = 20^{\circ}C$                      |   |
| $t_{CT} = 120^{\circ}C$                  |   |
| $\alpha = ?, Q = ?$                      |   |

Коэффициент объёмного расширения:

$$\beta = 1/T_{cp} = 1/343,15 = 0,0029 \text{ 1/К} .$$

Кинематическая вязкость:  $\nu = 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} .$

Теплопроводность:  $\lambda = 0,029 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град}) .$

Число Прандтля:  $Pr = 0,717 .$

Получим значения числа Грасгофа для заданных условий:

$$Gr = \frac{g\beta(t_{cm} - t_B)L^3}{\nu^2} = \frac{9,8 \cdot 0,0029(120 - 20)2^3}{(2,01 \cdot 10^{-5})^2} = 5,62 \cdot 10^{10} .$$

Число Релея принимает значение  $Gr \cdot Pr = 4,02 \cdot 10^{10} .$

По таблице определяем значения констант исходного уравнения подобия:  
 $c = 0,135; m = 1/3 .$

Таким образом, число Нуссельта равно:  $Nu = 0,135(4,02 \cdot 10^{10})^{1/3} = 462 .$

Зная число Нуссельта, определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{L} = 462 \frac{0,029}{2} = 6,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}) .$$

Тепловой поток, отводимый от стенки свободной конвекцией, можно рассчитать по закону Ньютона - Рихмана:

$$Q = \alpha F(t_{cm} - t_B) = 6,7 \cdot 2 \cdot 3 \cdot (120 - 20) = 4,02 \text{ кВт} .$$

Ответ:  $\alpha = 6,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}), Q = 4,02 \text{ кВт} .$

## 2.8. Типовая задача № 8

Определить коэффициент теплоотдачи и отводимый тепловой поток при течении воздуха в трубе диаметром 100 мм и длиной 10 м со скоростью 10 м/с. Средняя температура газа равна 50°C, а средняя температура стенки трубы 80°C.

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Теплоноситель :<br>воздух.           | По условию задачи течение в трубе происходит со скоростью 10 м/с, и эта скорость поддерживается внешними силами. Таким образом течение представляет собой вынужденную конвекцию воздуха. Теплообмен при вынужденной конвекции описывается законом подобия:<br>$Nu = a Re^n Pr^m$ .<br>Выпишем значения свойств воздуха, необходимые для расчёта чисел подобия, при определяющей температуре:<br>$t_{cp} = (t_{cm} + t_B) / 2 = (50 + 80) / 2 = 65^\circ C$ . |
| Труба.                               |  |
| $D = 100 \text{ мм} = 0,1 \text{ м}$ |  |
| $L = 10 \text{ м}$                   |  |
| $u_{cp} = 10 \text{ м/с}$            |  |
| $t_B = 50^\circ C$                   |  |
| $t_{cm} = 80^\circ C$                |  |
| $\alpha = ?, Q = ?$                  |  |

Кинематическая вязкость:  $\nu = \rho / \mu = 1,96 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с}$ .

Теплопроводность:  $\lambda = 0,029 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$ .

Число Прандтля:  $Pr = 0,717$ .

Получим значение числа Рейнольдса для заданных условий:

$$Re = u_{cp} D / \nu = 10 \cdot 0,1 / 1,96 \cdot 10^{-5} = 51 \cdot 10^3.$$

Т.к. число Рейнольдса больше критического значения – 2300, то режим течения в трубе турбулентный. Для такого режима течения константы, входящие в уравнение подобия, равны:  $a = 0,021$ ;  $n = 0,8$ ;  $m = 0,43$ .

Число Нуссельта для заданных условий равно:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} = 0,021 \cdot (51 \cdot 10^3)^{0,8} (0,717)^{0,43} = 106.$$

Зная число Нуссельта, определим коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / D = 106 \cdot 0,029 / 0,1 = 30,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град}).$$

Тепловой поток, отводимый от стенки трубы вынужденной конвекцией, можно рассчитать по закону Ньютона - Рихмана:

$$Q = \alpha L \cdot \pi D (t_{cm} - t_B) = 30,7 \cdot 10 \cdot 3,14 \cdot 0,1 \cdot (80 - 50) = 2,89 \text{ кВт}.$$

Ответ:  $\alpha = 30,7 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{град}), Q = 2,89 \text{ кВт}$ .

### 3. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

#### 3.1. Типовая задача № 1

В баллоне объемом  $V$  находится сжатый газообразный азот. Начальная температура азота  $t_1$ , давление по манометру  $p_{изб}$ . В процессе нагрева азота его температура увеличивается до  $t_2$ . Определить массу азота  $m$  и его давление после нагрева  $p_{2изб}$ , если атмосферное давление  $760 \text{ мм.рт.ст.}$ . Молекулярный вес азота принять равным  $28 \text{ кг/кмоль}$ .

| № варианта | $V, \text{ м}^3$ | $t_1, \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_2, \text{ }^\circ\text{C}$ | $p_{изб}, \text{ бар}$ | № варианта | $V, \text{ м}^3$ | $t_1, \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_2, \text{ }^\circ\text{C}$ | $p_{изб}, \text{ бар}$ |
|------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------|
| 1          | 0,2              | 20                            | 45                            | 10                     | 16         | 0,4              | 25                            | 60                            | 26                     |
| 2          | 0,3              | 21                            | 46                            | 12                     | 17         | 0,3              | 24                            | 61                            | 27                     |
| 3          | 0,4              | 22                            | 47                            | 13                     | 18         | 0,2              | 23                            | 62                            | 28                     |
| 4          | 0,5              | 23                            | 48                            | 14                     | 19         | 0,1              | 22                            | 63                            | 29                     |
| 5          | 0,6              | 24                            | 49                            | 15                     | 20         | 1,2              | 20                            | 70                            | 10                     |
| 6          | 0,7              | 25                            | 50                            | 16                     | 21         | 1,3              | 22                            | 80                            | 10                     |
| 7          | 0,8              | 26                            | 51                            | 17                     | 22         | 1,4              | 23                            | 72                            | 10                     |
| 8          | 0,9              | 27                            | 52                            | 18                     | 23         | 1,5              | 24                            | 74                            | 10                     |
| 9          | 1,0              | 28                            | 53                            | 19                     | 24         | 1,6              | 25                            | 75                            | 10                     |
| 10         | 1,0              | 29                            | 54                            | 20                     | 25         | 1,7              | 26                            | 76                            | 10                     |
| 11         | 0,9              | 30                            | 55                            | 21                     | 26         | 1,8              | 27                            | 77                            | 10                     |
| 12         | 0,8              | 29                            | 56                            | 22                     | 27         | 1,9              | 28                            | 79                            | 10                     |
| 13         | 0,7              | 28                            | 57                            | 23                     | 28         | 2,0              | 29                            | 81                            | 10                     |
| 14         | 0,6              | 27                            | 58                            | 24                     | 29         | 2,1              | 30                            | 82                            | 10                     |
| 15         | 0,5              | 26                            | 59                            | 25                     | 30         | 2,2              | 31                            | 83                            | 10                     |

#### 3.2. Типовая задача № 2

Рассчитать изменение удельной внутренней энергии  $\Delta u_{1-2}$  и удельной энтальпии  $\Delta h_{1-2}$  воздуха в адиабатном термодинамическом процессе 1-2. Начальные параметры воздуха: давление  $p_1$ , температура  $t_1$ ; конечное давление  $p_2$ . Воздух считать идеальным газом, газовая постоянная  $R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$ , удельная теплоемкость при постоянном давлении  $c_p = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}$ , показатель адиабаты  $k = 1,4$ .

| № варианта | $p_1, \text{бар}$ | $t_1, ^\circ\text{C}$ | $p_2, \text{бар}$ | № варианта | $p_1, \text{бар}$ | $t_1, ^\circ\text{C}$ | $p_2, \text{бар}$ |
|------------|-------------------|-----------------------|-------------------|------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| 1          | 10                | 45                    | 0,2               | 16         | 26                | 60                    | 0,4               |
| 2          | 12                | 46                    | 0,3               | 17         | 27                | 61                    | 0,3               |
| 3          | 13                | 47                    | 0,4               | 18         | 28                | 62                    | 0,2               |
| 4          | 14                | 48                    | 0,5               | 19         | 29                | 63                    | 0,1               |
| 5          | 15                | 49                    | 0,6               | 20         | 21                | 55                    | 0,9               |
| 6          | 16                | 50                    | 0,7               | 21         | 20                | 50                    | 0,1               |
| 7          | 17                | 51                    | 0,8               | 22         | 10                | 45                    | 0,2               |
| 8          | 18                | 52                    | 0,9               | 23         | 12                | 46                    | 0,3               |
| 9          | 19                | 53                    | 1,0               | 24         | 13                | 47                    | 0,4               |
| 10         | 20                | 54                    | 1,0               | 25         | 14                | 48                    | 0,5               |
| 11         | 21                | 55                    | 0,9               | 26         | 15                | 49                    | 0,6               |
| 12         | 22                | 56                    | 0,8               | 27         | 16                | 50                    | 0,7               |
| 13         | 23                | 57                    | 0,7               | 28         | 17                | 51                    | 0,8               |
| 14         | 24                | 58                    | 0,6               | 29         | 18                | 52                    | 0,9               |
| 15         | 25                | 59                    | 0,5               | 30         | 19                | 53                    | 1,0               |

### 3.3. Типовая задача № 3

1 кг воздуха сжимается в компрессоре по политропному процессу с показателем политропы  $n$  от начальных параметров: давление  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  и температуры  $t_1 = 20 ^\circ\text{C}$  до конечного давления  $p_2$ . Определить удельную работу сжатия  $l$  и удельную теплоту процесса  $q$  при  $R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$  и  $c_p = 1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$ .

| № варианта | $p_2, \text{МПа}$ | $n$ | № варианта | $p_2, \text{МПа}$ | $n$ |
|------------|-------------------|-----|------------|-------------------|-----|
| 1          | 0,2               | 1,0 | 16         | 1,55              | 1,5 |
| 2          | 0,3               | 1,0 | 17         | 1,6               | 1,5 |
| 3          | 0,4               | 1,0 | 18         | 1,65              | 1,5 |
| 4          | 0,5               | 1,1 | 19         | 1,7               | 1,5 |
| 5          | 0,6               | 1,1 | 20         | 1,75              | 1,6 |
| 6          | 0,7               | 1,1 | 21         | 1,8               | 1,7 |
| 7          | 0,8               | 1,2 | 22         | 1,85              | 1,8 |
| 8          | 0,9               | 1,2 | 23         | 1,9               | 1,9 |
| 9          | 1,0               | 1,2 | 24         | 1,95              | 2,0 |
| 10         | 1,1               | 1,3 | 25         | 2,0               | 2,1 |

|    |      |     |    |      |     |
|----|------|-----|----|------|-----|
| 11 | 1,2  | 1,3 | 26 | 2,05 | 2,2 |
| 12 | 1,3  | 1,3 | 27 | 2,1  | 2,3 |
| 13 | 1,4  | 1,4 | 28 | 2,15 | 2,4 |
| 14 | 1,45 | 1,4 | 29 | 2,2  | 2,5 |
| 15 | 1,5  | 1,4 | 30 | 2,25 | 2,6 |

### 3.4. Типовая задача № 4

Определить количество теплоты  $Q$ , необходимой для превращения 1 кг воды с температурой  $t_0$  в перегретый пар с температурой  $t_1$  в изобарном процессе с давлением  $p$ .

| № варианта | $p, \text{ МПа}$ | $t_0, ^\circ\text{C}$ | $t_1, ^\circ\text{C}$ | № варианта | $p, \text{ МПа}$ | $t_0, ^\circ\text{C}$ | $t_1, ^\circ\text{C}$ |
|------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------|------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1          | 0,05             | 30                    | 120                   | 16         | 0,8              | 45                    | 195                   |
| 2          | 0,1              | 30                    | 120                   | 17         | 0,85             | 50                    | 195                   |
| 3          | 0,15             | 30                    | 130                   | 18         | 0,9              | 50                    | 200                   |
| 4          | 0,2              | 30                    | 135                   | 19         | 0,95             | 50                    | 200                   |
| 5          | 0,25             | 35                    | 140                   | 20         | 1,0              | 20                    | 210                   |
| 6          | 0,3              | 35                    | 145                   | 21         | 1,05             | 20                    | 215                   |
| 7          | 0,35             | 35                    | 155                   | 22         | 1,1              | 20                    | 220                   |
| 8          | 0,4              | 35                    | 165                   | 23         | 1,15             | 20                    | 230                   |
| 9          | 0,45             | 40                    | 170                   | 24         | 1,2              | 20                    | 240                   |
| 10         | 0,5              | 40                    | 175                   | 25         | 1,25             | 20                    | 250                   |
| 11         | 0,55             | 40                    | 180                   | 26         | 1,3              | 20                    | 260                   |
| 12         | 0,6              | 40                    | 185                   | 27         | 1,35             | 20                    | 270                   |
| 13         | 0,65             | 45                    | 185                   | 28         | 1,4              | 20                    | 280                   |
| 14         | 0,7              | 45                    | 190                   | 29         | 1,45             | 20                    | 290                   |
| 15         | 0,75             | 45                    | 190                   | 30         | 1,5              | 20                    | 300                   |

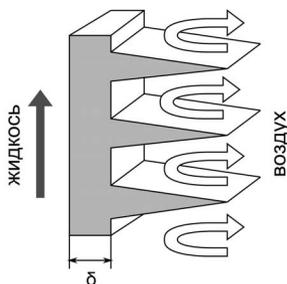
### 3.5. Типовая задача № 5

Определить плотность теплового потока и рассчитать поле температур в плоской трехслойной стенке, состоящей из слоя штукатурки толщиной  $\delta_{шт} = 5 \text{ см}$ , кирпича толщиной  $\delta_k$  и дерева толщиной  $\delta_d$ , если температура наружной поверхности штукатурки  $t_{cm1} = -40 \text{ }^\circ\text{C}$ , а внутренней поверхности дерева  $t_{cm2} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Принять коэффициенты теплопроводности штукатурки, кирпича и дерева равными

0,78 Вт/м·град, 0,25 Вт/м·град и 0,1 Вт/м·град соответственно.  
 Построить график изменения температуры по толщине стенки.

| № варианта | $\delta_K, \text{см}$ | $\delta_D, \text{см}$ | № варианта | $\delta_K, \text{см}$ | $\delta_D, \text{см}$ |
|------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| 1          | 20                    | 1                     | 16         | 30                    | 2                     |
| 2          | 20                    | 1,5                   | 17         | 30                    | 1,5                   |
| 3          | 20                    | 2                     | 18         | 30                    | 1                     |
| 4          | 22                    | 2,5                   | 19         | 32                    | 1                     |
| 5          | 22                    | 3                     | 20         | 38                    | 1                     |
| 6          | 22                    | 3,5                   | 21         | 38                    | 2                     |
| 7          | 24                    | 4                     | 22         | 38                    | 3                     |
| 8          | 24                    | 4,5                   | 23         | 40                    | 4                     |
| 9          | 24                    | 5                     | 24         | 40                    | 5                     |
| 10         | 26                    | 5,5                   | 25         | 40                    | 6                     |
| 11         | 26                    | 4,5                   | 26         | 30                    | 7                     |
| 12         | 26                    | 4                     | 27         | 30                    | 8                     |
| 13         | 28                    | 3,5                   | 28         | 30                    | 9                     |
| 14         | 28                    | 3                     | 29         | 32                    | 10                    |
| 15         | 28                    | 2,5                   | 30         | 34                    | 11                    |

### 3.6. Типовая задача № 6



Определить тепловой поток, передаваемый через  $F_{CT} = 1 \text{ м}^2$  оребренной алюминиевой стенки, если со стороны оребрения стенка омывается воздухом с температурой  $t_B$ , а со стороны плоской поверхности жидкостью с температурой  $t_J$ . Площадь поверхности стенки между ребрами  $F_{MP}$ , площадь поверхности ребер  $F_p$ , толщина стенки

$\delta = 9 \text{ мм}$ , коэффициент теплоотдачи со стороны оребренной поверхности равен  $\alpha_B = 11,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ , со стороны плоской поверхности  $\alpha_J = 291 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ , коэффициент теплопроводности алюминия  $\lambda_{CT} = 203,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ . Определить во сколько раз оребрение увеличивает тепловой поток, передаваемый через стенку.

| № варианта | $F_{MP},$<br>$м^2$ | $F_P,$<br>$м^2$ | $t_{ж},$<br>$^{\circ}C$ | $t_B,$<br>$^{\circ}C$ | № варианта | $F_{MP},$<br>$м^2$ | $F_P,$<br>$м^2$ | $t_{ж},$<br>$^{\circ}C$ | $t_B,$<br>$^{\circ}C$ |
|------------|--------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|------------|--------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| 1          | 0,5                | 10              | 80                      | 10                    | 16         | 0,6                | 10              | 95                      | 25                    |
| 2          | 0,5                | 10              | 85                      | 15                    | 17         | 0,65               | 10              | 70                      | 10                    |
| 3          | 0,5                | 10              | 90                      | 20                    | 18         | 0,7                | 10              | 75                      | 15                    |
| 4          | 0,5                | 10              | 95                      | 25                    | 19         | 0,75               | 10              | 80                      | 20                    |
| 5          | 0,5                | 10              | 75                      | 10                    | 20         | 0,5                | 11              | 80                      | 25                    |
| 6          | 0,7                | 11              | 80                      | 15                    | 21         | 0,5                | 12              | 85                      | 10                    |
| 7          | 0,8                | 12              | 85                      | 20                    | 22         | 0,5                | 13              | 90                      | 15                    |
| 8          | 0,9                | 13              | 90                      | 25                    | 23         | 0,5                | 14              | 95                      | 20                    |
| 9          | 1                  | 14              | 95                      | 10                    | 24         | 0,5                | 6               | 70                      | 25                    |
| 10         | 0,1                | 10              | 70                      | 15                    | 25         | 0,7                | 7               | 75                      | 10                    |
| 11         | 0,2                | 10              | 75                      | 20                    | 26         | 0,8                | 8               | 80                      | 11                    |
| 12         | 0,3                | 10              | 80                      | 25                    | 27         | 0,9                | 9               | 85                      | 12                    |
| 13         | 0,4                | 10              | 80                      | 10                    | 28         | 1                  | 10              | 90                      | 13                    |
| 14         | 0,5                | 10              | 85                      | 15                    | 29         | 0,5                | 11              | 70                      | 14                    |
| 15         | 0,55               | 10              | 90                      | 20                    | 30         | 0,55               | 12              | 80                      | 15                    |

### 3.7. Типовая задача № 7

Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, отдаваемый вертикальной стенкой высотой  $L$  и шириной  $b$  воздуху, если средняя температура стенки  $t_{cm} = 110^{\circ}C$ , а температура воздуха вдали от нее  $t_B$ .

| № варианта | $L, м$ | $b, м$ | $t_B, ^{\circ}C$ | № варианта | $L, м$ | $b, м$ | $t_B, ^{\circ}C$ |
|------------|--------|--------|------------------|------------|--------|--------|------------------|
| 1          | 0,5    | 1      | 20               | 16         | 0,6    | 0,45   | 60               |
| 2          | 0,5    | 2      | 25               | 17         | 0,65   | 0,5    | 20               |
| 3          | 0,5    | 3      | 30               | 18         | 0,7    | 0,55   | 25               |
| 4          | 0,5    | 4      | 35               | 19         | 0,75   | 0,6    | 30               |
| 5          | 0,5    | 5      | 40               | 20         | 0,5    | 0,65   | 35               |
| 6          | 0,7    | 1      | 45               | 21         | 0,5    | 0,7    | 40               |
| 7          | 0,8    | 2      | 55               | 22         | 0,5    | 0,75   | 45               |
| 8          | 0,9    | 3      | 60               | 23         | 0,5    | 0,8    | 55               |
| 9          | 1      | 4      | 20               | 24         | 0,5    | 0,85   | 60               |
| 10         | 0,1    | 5      | 25               | 25         | 0,7    | 0,9    | 20               |
| 11         | 0,2    | 0,2    | 30               | 26         | 0,8    | 0,95   | 30               |

|    |      |      |    |    |      |     |    |
|----|------|------|----|----|------|-----|----|
| 12 | 0,3  | 0,25 | 35 | 27 | 0,9  | 1   | 40 |
| 13 | 0,4  | 0,3  | 40 | 28 | 1    | 1,1 | 50 |
| 14 | 0,5  | 0,35 | 45 | 29 | 0,5  | 1,2 | 60 |
| 15 | 0,55 | 0,4  | 55 | 30 | 0,55 | 1,3 | 20 |

### 3.8. Типовая задача № 8

Определить коэффициент теплоотдачи и отводимый тепловой поток при течении воздуха в трубе диаметром  $D$  и длиной  $L=10$  м со скоростью  $u_{cp} = 10$  м/с. Средняя температура газа равна  $t_B$ , а средняя температура стенки трубы  $t_{cm}$ .

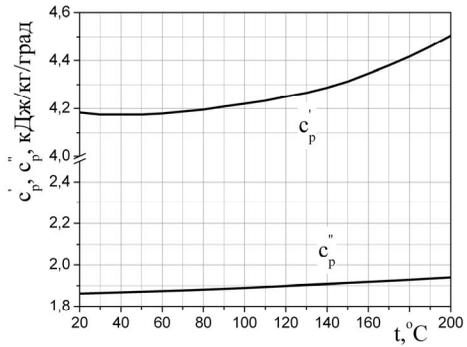
| № варианта | $D, м$ | $t_{cm}, ^\circ C$ | $t_B, ^\circ C$ | № варианта | $D, м$ | $t_{cm}, ^\circ C$ | $t_B, ^\circ C$ |
|------------|--------|--------------------|-----------------|------------|--------|--------------------|-----------------|
| 1          | 0,05   | 70                 | 20              | 16         | 0,15   | 120                | 60              |
| 2          | 0,075  | 75                 | 25              | 17         | 0,2    | 75                 | 20              |
| 3          | 0,1    | 80                 | 30              | 18         | 0,25   | 80                 | 25              |
| 4          | 0,125  | 85                 | 35              | 19         | 0,1    | 85                 | 30              |
| 5          | 0,15   | 90                 | 40              | 20         | 0,15   | 90                 | 35              |
| 6          | 0,175  | 95                 | 45              | 21         | 0,2    | 95                 | 40              |
| 7          | 0,2    | 100                | 55              | 22         | 0,25   | 100                | 45              |
| 8          | 0,225  | 110                | 60              | 23         | 0,3    | 110                | 55              |
| 9          | 0,25   | 75                 | 20              | 24         | 0,05   | 120                | 60              |
| 10         | 0,1    | 80                 | 25              | 25         | 0,1    | 100                | 20              |
| 11         | 0,2    | 85                 | 30              | 26         | 0,15   | 105                | 30              |
| 12         | 0,3    | 90                 | 35              | 27         | 0,2    | 110                | 40              |
| 13         | 0,4    | 95                 | 40              | 28         | 0,25   | 115                | 50              |
| 14         | 0,5    | 100                | 45              | 29         | 0,3    | 120                | 60              |
| 15         | 0,1    | 110                | 55              | 30         | 0,05   | 125                | 20              |

## 4. ПРИЛОЖЕНИЕ

### 4.1. Свойства воды и водяного пара

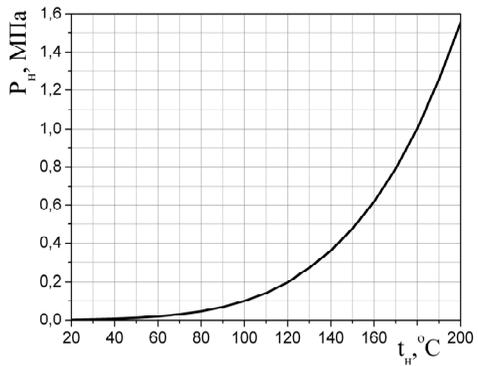
Зависимость истинной теплоемкости воды и водяного пара от температуры.

| $t, ^\circ\text{C}$ | $c_p',$<br>$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ | $c_p'',$<br>$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ |
|---------------------|---|--|
| 20                  | 4,183   | 1,862  |
| 40                  | 4,174   | 1,867  |
| 60                  | 4,179   | 1,874  |
| 80                  | 4,195   | 1,881  |
| 100                 | 4,220   | 1,889  |
| 120                 | 4,250   | 1,898  |
| 140                 | 4,287   | 1,908  |
| 160                 | 4,346   | 1,918  |
| 180                 | 4,417   | 1,928  |
| 200                 | 4,505   | 1,939  |



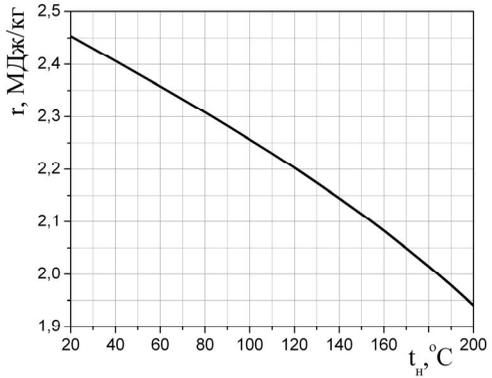
Зависимость давления насыщенных водяных паров от температуры.

| $t_n, ^\circ\text{C}$ | $P_n,$<br>$\text{МПа}$ |
|-----------------------|------------------------|
| 20                    | 0,0023                 |
| 40                    | 0,0073                 |
| 60                    | 0,0199                 |
| 80                    | 0,0473                 |
| 100                   | 0,1013                 |
| 120                   | 0,1985                 |
| 140                   | 0,3613                 |
| 160                   | 0,6180                 |
| 180                   | 1,0027                 |
| 200                   | 1,5550                 |



Зависимость удельной теплоты парообразования воды от температуры.

| $t_n, ^\circ\text{C}$ | $r,$<br>$\text{МДж} / \text{кг}$ |
|-----------------------|----------------------------------|
| 20                    | 2,4538                           |
| 40                    | 2,4062                           |
| 60                    | 2,3579                           |
| 80                    | 2,3082                           |
| 100                   | 2,2567                           |
| 120                   | 2,2025                           |
| 140                   | 2,1448                           |
| 160                   | 2,0826                           |
| 180                   | 2,0149                           |
| 200                   | 1,9404                           |



#### 4.2. Физические параметры сухого воздуха при давлении 760 мм. рт. ст.

| $t, ^\circ\text{C}$ | $\rho,$<br>$\text{кг} / \text{м}^3$ | $\nu \cdot 10^5,$<br>$\text{м}^2 / \text{с}$ | $\lambda,$<br>$\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{град})$ | $c_p,$<br>$\text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град})$ | Pr    |
|---------------------|-------------------------------------|--|--|---|-------|
| 10                  | 1,247                               | 1,43   | 0,024  | 1004  | 0,719 |
| 20                  | 1,204                               | 1,52   | 0,025  | 1005  | 0,718 |
| 30                  | 1,164                               | 1,61   | 0,026  | 1005  | 0,718 |
| 40                  | 1,127                               | 1,71   | 0,027  | 1006  | 0,717 |
| 50                  | 1,092                               | 1,81   | 0,027  | 1007  | 0,717 |
| 60                  | 1,060                               | 1,91   | 0,028  | 1008  | 0,717 |
| 70                  | 1,029                               | 2,01   | 0,029  | 1008  | 0,717 |
| 80                  | 1,000                               | 2,11   | 0,029  | 1009  | 0,717 |
| 90                  | 0,972                               | 2,21   | 0,030  | 1010  | 0,717 |
| 100                 | 0,946                               | 2,32   | 0,030  | 1011  | 0,717 |
| 120                 | 0,898                               | 2,54   | 0,032  | 1014  | 0,717 |
| 140                 | 0,854                               | 2,77   | 0,033  | 1016  | 0,717 |
| 160                 | 0,815                               | 3,00   | 0,034  | 1019  | 0,718 |
| 180                 | 0,779                               | 3,24   | 0,035  | 1022  | 0,718 |
| 200                 | 0,746                               | 3,49   | 0,037  | 1025  | 0,719 |

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| 1. Методические указания к решению типовых задач.....                     | 3  |
| 1.1. Система единиц измерения .....                                       | 3  |
| 1.2. Уравнение состояния идеального газа .....                            | 4  |
| 1.3. Внутренняя энергия, теплота, работа и первый закон термодинамики ... | 5  |
| 1.4. Теплоемкость термодинамической системы, показатель адиабаты .....    | 7  |
| 1.5. Политропный процесс .....  | 8  |
| 1.6. Адиабатный термодинамический процесс.....                            | 10 |
| 1.7. Процесс парообразования (p-v – диаграмма водяного пара) .....        | 11 |
| 1.8. Передача теплоты через плоскую стенку в стационарных условиях .....  | 13 |
| 1.9. Теплообмен при свободной и вынужденной конвекции .....               | 14 |
| 2. Примеры решения типовых задач .....                                    | 19 |
| 2.1. Типовая задача № 1 .....   | 19 |
| 2.2. Типовая задача № 2 .....   | 20 |
| 2.3. Типовая задача № 3 .....   | 21 |
| 2.4. Типовая задача № 4 .....   | 22 |
| 2.5. Типовая задача № 5 .....   | 23 |
| 2.6. Типовая задача № 6 .....   | 25 |
| 2.7. Типовая задача № 7 .....   | 26 |
| 2.8. Типовая задача № 8 .....   | 28 |
| 3. Варианты заданий .....   | 29 |
| 3.1. Типовая задача № 1 .....   | 29 |
| 3.2. Типовая задача № 2 .....   | 29 |
| 3.3. Типовая задача № 3 .....   | 30 |
| 3.4. Типовая задача № 4 .....   | 31 |
| 3.5. Типовая задача № 5 .....   | 31 |
| 3.6. Типовая задача № 6 .....   | 32 |
| 3.7. Типовая задача № 7 .....   | 33 |
| 3.8. Типовая задача № 8 .....   | 34 |
| 4. Приложение .....   | 35 |
| 4.1. Свойства воды и водяного пара .....                                  | 35 |
| 4.2. Физические параметры сухого воздуха при давлении 760 мм. рт. ст. ... | 36 |

# ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания

В авторской редакции

---

Подписано в печать 18.03.2010 г. Формат 60 x 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 100 экз.  
Уч.-изд. л. 2,32 Печ. л.2,5 Изд. № 64 Заказ № 772 Цена договорная

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

