

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Решения задач размещены на сайте zadachi24.ru Кафедра «Теплохладотехника»

«ТЕПЛО - И ХЛАДОТЕХНИКА»

Методические указания
к выполнению контрольных работ для студентов
заочной формы обучения направления 260100
«Продукты питания из растительного сырья»

Кемерово 2014

Составили:

Л.М. Архипова, доцент, канд.техн.наук
В.А. Ермолаев, доцент, канд.техн.наук
Л.В. Лифенцева, доцент, канд.техн.наук

*Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры
теплохладотехники
Протокол № 7-1 от 22.04.2014*

*Рекомендовано методической комиссией
механического факультета
Протокол № от 2014*

Представлены задачи и примеры решения для изучения дисциплины «Тепло-хладотехника».

Предназначены для студентов заочной формы обучения направления 260100 «Продукты питания из растительного сырья»

*Охраняется законом об авторском праве,
не может быть использовано любым не-
законным способом без письменного
договора*

СОДЕРЖАНИЕ

1. Рабочая программа курса «Тепло-хладотехника»	4
1.1. Организация изучения дисциплины.....	4
1.2. Цель изучения дисциплины.....	5
2. Список литературы.....	6
3. Практические занятия.....	7
3.1. Расчет параметров и процессов идеального газа.....	7
3.2. Расчет процессов водяного пара	10
3.3. Циклы холодильных машин	16
3.4. Влажный воздух	19
3.5. Расчет стационарной теплопроводности и теплопередачи	21
3.6. Расчет теплоотдачи при свободной и вынужденной конвекциях	23
3.7. Теплообменные аппараты	26
4. Контрольная работа	29
5. Вопросы к экзамену	40
ПРИЛОЖЕНИЕ	43
ДИАГРАММА	50

Тепло-хладотехника является общетехнической дисциплиной, которая занимает одно из центральных мест в инженерной подготовке специалистов. Это обусловлено тем, что процессы получения, использования и переноса теплоты, получения холода имеют место во многих технических устройствах и технологических процессах.

Теоретическими основами тепло-хладотехники являются: техническая термодинамика и теория теплообмена.

На предприятиях пищевой промышленности расходуется большое количество теплоты и холода как на основные технологические процессы, связанные с переработкой сырья, производством технологической продукции, так и на вспомогательные нужды. Значительное количество теплоты расходуется на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха. Современный специалист должен уметь правильно формулировать и решать разнообразные прикладные задачи с использованием основных законов термодинамики и теплообмена.

1. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ПО КУРСУ «ТЕПЛО-ХЛАДОТЕХНИКА»

1.1. Организация изучения дисциплины

Согласно учебному плану, теплотехника изучается один семестр (проводятся две сессии). В течение первой сессии преподается теоретический курс и проводятся практические занятия. В промежутке между сессиями студенты должны самостоятельно изучить материал, опираясь на прослушанные лекции, и выполнить контрольную работу. Во вторую сессию проводятся оставшиеся практические занятия, после чего необходимо сдать экзамен.

Учебный план предусматривает выполнение одной контрольной работы.

1.2. Цель изучения дисциплины.

Получение знаний о характере теплотехнических процессов, которые используются в пищевых производствах, их физических основах и методах расчета; об устройстве и работе применяемого на пищевых предприятиях теплотехнического оборудования и холодильных машин.

В результате изучения курса «Теплотехники» студент должен знать основные разделы:

Термодинамика. Основные понятия и определения. 1 и 2 законы термодинамики. Термодинамические процессы рабочих тел, термодинамические циклы. Газовые смеси. Влажный воздух.

Теплопередача: теплопроводность, конвективный теплообмен, теплообмен излучением. Сложный теплообмен. Теплообменные аппараты и их расчет.

2. Список литературы

1. Лифенцева Л.В. Теплотехника. Учебное пособие. – Изд. 2-е, перераб. и доп.-Кемерово, 2010.-188 с.
2. Буянов О.Н. Тепло - и хладоснабжение предприятий пищевой промышленности. Учебное пособие. Часть1, Часть 2. - .Кемерово, 2001.- 222 с.
3. Теплотехника: Учебник для вузов /Под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 224 с.
4. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. Службой стандартных справочных данных. – М.: Энергоиздат , 1984. - 80 с.
5. Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике. М.: Машиностроение, 1973. - 344 с.
6. Самойлов А.И. Сборник задач по термодинамическим процессам и процессам теплообмена в машинах и аппаратах холодильных установок. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 144 с.

Для изучения тепло-хладотехники можно использовать другие учебники для ВУЗов по этой дисциплине.

3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

На практических занятиях решаются задачи по основным разделам курса. Наибольшее внимание уделяется усвоению законов термодинамики и теплообмена, методам расчета и анализа процессов и циклов холодильных машин.

3.1. Расчет параметров и процессов идеального газа

Основными параметрами состояния являются: удельный объем, абсолютная температура, абсолютное давление.

Удельный объем v , м³/кг:

$$v = V/m = 1/\rho,$$

где V , м³ – объем, m , кг – масса, ρ , кг/м³ – плотность.

Абсолютная температура T , К:

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

Абсолютное давление p , Па:

$$p = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}},$$

$$p = p_{\text{атм}} - p_{\text{вак}}.$$

где: $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление,

$p_{\text{изб}}$ – избыточное давление,

$p_{\text{вак}}$ – вакуумное давление.

Связь между единицами измерения:

$$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}; \quad 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па},$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па} = 100 \text{ кПа},$$

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98000 \text{ Па} = 98 \text{ кПа},$$

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}.$$

В технической термодинамике рассматривают следующие основные термодинамические процессы:

изохорный – при постоянном объеме ($v = \text{const}$),

изобарный – при постоянном давлении ($p = \text{const}$),

изотермический – при постоянной температуре ($T = \text{const}$),

адиабатный – без внешнего теплообмена ($\delta q = 0$),

политропный – при постоянной теплоемкости.

Характеристики, относящиеся к 1 кг вещества, называются удельными, они обозначаются строчными буквами, а характеристики, относящиеся к полной массе – заглавными. Полные характеристики получаются умножением удельных на величину массы:

$$Q = m \cdot q, L = m \cdot \ell.$$

Уравнение состояния идеального газа:

$$p \cdot v = R \cdot T \quad \text{для 1 кг идеального газа;}$$

$p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ при расчетах с произвольной массой m ,

где R , Дж/(кг·К) – удельная газовая постоянная (таблица 1 Приложения).

$$R = R_{\mu} / \mu = 8,31451 \cdot 10^3 / \mu.$$

1 закон термодинамики: $q = \Delta u + \ell$.

В таблице 1 приведены формулы для расчета процессов.

Таблица 1

Процесс	Связь параметров	Работа изменения объема	Теплота
Изохорный	$p_2/p_1 = T_2/T_1$	$\ell = 0$	$q = c_v (T_2 - T_1)$
Изобарный	$v_2/v_1 = T_2/T_1$	$\ell = p (v_2 - v_1)$	$q = c_p (T_2 - T_1)$
Изотермический	$p_2/p_1 = v_1/v_2$	$\ell = RT \ln (v_2/v_1)$ $\ell = RT \ln (p_1/p_2)$	$q = \ell$
Адиабатный	$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^k$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{k-1}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$	$\ell = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$	$q = 0$
Политропный	$p_2/p_1 = (v_1/v_2)^n$ $T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}$ $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(n-1)/n}$	$\ell = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$	$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)$

Изменение внутренней энергии идеального газа в термодинамическом процессе:

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

Изменение энтальпии идеального газа в термодинамическом процессе:

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1).$$

Массовые теплоемкости идеального газа c_p и c_v можно определить по формулам:

$$c_p = k \cdot R / (k-1); \quad c_v = R / (k-1),$$

или как отношение мольной теплоёмкости газов к молекулярной массе (таблица 2 Приложения):

$$c_v = \mu c_v / \mu, \quad c_p = \mu c_p / \mu,$$

$k = c_p / c_v$ - показатель адиабаты или коэффициент Пуассона.

Задачи

Задача 3.1. При температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ 2 кг углекислоты сжимается изотермически до десятикратного уменьшения объема. Определить конечное давление p_2 , работу сжатия и отводимую теплоту, если начальное давление $p_1 = 0,1$ МПа. Принять, что газ идеальный.

Решение.

Конечное давление:

$$p_2 / p_1 = V_1 / V_2,$$

$$p_2 = p_1 (V_1 / V_2) = 0,1 \cdot (10/1) = 1,0 \text{ МПа.}$$

Так как для идеального газа в изотермическом процессе нет изменения внутренней энергии, то по первому закону термодинамики теплота процесса равна работе:

$$L = Q = m \cdot R \cdot T \ln (v_2 / v_1).$$

$$L = 2 \cdot 189 \cdot 293 \ln (1/10) = -254,6 \text{ кДж.}$$

Задача 3.2. 1 кг воздуха адиабатно расширяется от начального состояния с температурой $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и давлением $p_1 = 0,8$ МПа до давления $p_2 = 0,2$ МПа. Определить параметры газа в конце расширения, работу процесса и изменение внутренней энергии газа.

Решение. Температура в конце адиабатного расширения:

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 293 (0,2/0,8)^{(1,4-1)/1,4} = 198 \text{ К} = - 75^\circ\text{С}.$$

Удельный объем воздуха в конце расширения:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 198}{0,2 \cdot 10^6} = 0,284 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Работа адиабатного процесса:

$$\ell = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{287}{1,4-1} (293 - 198) = 68000 \text{ Дж/кг}$$

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = -\ell = - 68000 \text{ Дж/кг}.$$

3.2. РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ВОДЯНОГО ПАРА

Расчет параметров по таблицам водяного пара

Таблицы для определения термодинамических свойств веществ различаются в зависимости от того, какое состояние рассматривается: однофазное или двухфазное. В таблицах для состояния насыщения ([4] и таблицы 7 Приложения) удельные значения объема, энтальпии и энтропии насыщенной жидкости отмечаются одним штрихом, сухого насыщенного пара отмечаются двумя штрихами. Для определения свойств каждой из фаз в состоянии насыщения надо знать только один параметр - давление или температуру, т.к. при насыщении они однозначно связаны между собой.

В этих же таблицах приводится удельная теплота парообразования $r = h'' - h'$ - разность энтальпий сухого насыщенного пара и насыщенной жидкости. Для расчета параметров влажного насыщенного пара необходимо знать также степень сухости пара x .

Параметры влажного пара рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned} v &= v'' \cdot x + v' \cdot (1-x), \\ h &= h'' \cdot x + h' \cdot (1-x) = h' + r \cdot x, \\ s &= s'' \cdot x + s' \cdot (1-x) = s' + (r \cdot x)/T_s \end{aligned}$$

Степень сухости пара определяется по одной из

следующих формул:

$$x = (s - s') / (s'' - s'),$$

$$x = (h - h') / (h'' - h'),$$

$$x = (v - v') / (v'' - v').$$

Для определения свойств в однофазном состоянии надо знать два параметра этого состояния - обычно давление и температуру. В ячейке таблицы, соответствующей данному состоянию, помещены удельные значения объема «v», энтальпии «h» и энтропии «s».

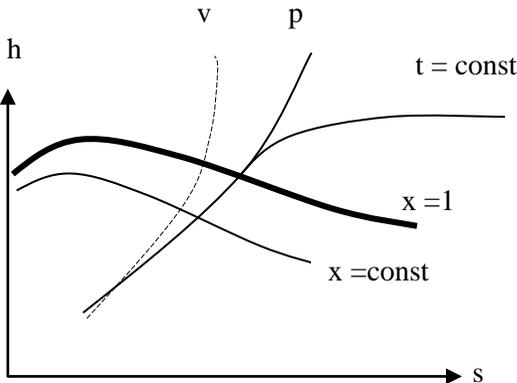
Внутренняя энергия для воды и водяного пара рассчитывается по формуле:

$$u = h - p \cdot v.$$

Расчет по h,s - диаграмме

На диаграмме h,s обычно наносятся:

- линии изобар ($p = \text{const}$);
 - линии изотерм ($t = \text{const}$);
- в области влажного пара изотермы не наносят, так как они совпадают с изобарами;
- изохоры ($v = \text{const}$), изображаются пунктирной линией или линией другого цвета;
 - линии постоянной степени сухости влажного пара ($x = \text{const}$) наносятся в области влажного насыщенного пара.



h,s - диаграмма

Расчет процессов водяного пара

Расчет процессов водяного пара заключается в определении всех параметров начального и конечного состояния, теплоты и работы процесса.

Параметры начального и конечного состояний определяются с помощью диаграмм или по таблицам. Способ расчета с помощью таблиц более точен и не имеет ограничений. Способ с использованием h,s -диаграммы более прост, нагляден, но возможен только для влажного насыщенного пара с $x > 0,6$, сухого насыщенного пара и перегретого пара.

Изменение внутренней энергии для процесса определяется по уравнению:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1)$$

Расчетные формулы для теплоты q , работы ℓ приведены в таблице 2.

Таблица 2

Процесс	Работа изменения объема	Теплота
Изохорный	$\ell = 0$	$q = u_2 - u_1 = (h_2 - h_1) - v \cdot (p_2 - p_1)$
Изобарный	$\ell = q - \Delta u$ $\ell = p(v_2 - v_1)$	$q = h_2 - h_1$
Изотермический	$\ell = q - \Delta u$	$q = T \cdot (s_2 - s_1)$
Адиабатный	$\ell = (u_2 - u_1)$	$q = 0$

Задача 3.3. Определить параметры влажного водяного пара при давлении 2,0 МПа и степени сухости 0,9.

Решение. Из таблиц водяного пара находим параметры кипящей воды «'» и сухого насыщенного пара «"» при 2,0 МПа:

p	t_H	v'	v''	h'	h''	s'	s''
МПа	°С	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
2,0	212,37	0,00118	0,0995	908,6	2797,4	2,4468	6,3373

По этим данным определяются параметры пара:

$$v = v'' \cdot x + v' \cdot (1-x) = 0,0995 \cdot 0,9 + 0,00118 \cdot 0,1 = 0,098 \text{ м}^3/\text{кг},$$

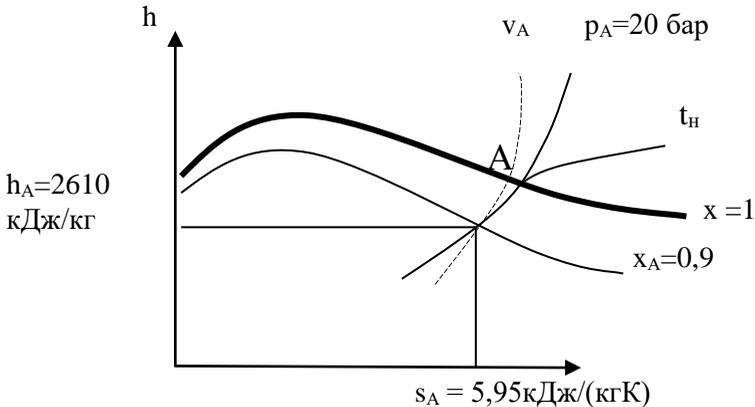
$$h = h' + r \cdot x = 908,6 + 1888,8 \cdot 0,9 = 2608,52 \text{ кДж/кг.}$$

$$s = s' + (r \cdot x)/T_s = 2,4468 + (1888,8 \cdot 0,9)/485,52 = 5,95 \text{ кДж/(кг·К)}$$

где $r = h'' - h'$

Можно определить параметры пара по *no h,s* – диаграмме:

Задача 3.4. 1кг водяного пара, начальное состояние которого задано параметрами $p_1=50$ бар ($5 \cdot 10^3$ кПа), $t_1=400$ °С,



К задаче 3.3.

расширяется адиабатно до давления $p_2=0,5$ бар (50 кПа).

Определить параметры v_1 , h_1 , s_1 , v_2 , t_2 , h_2 и работу процесса l .

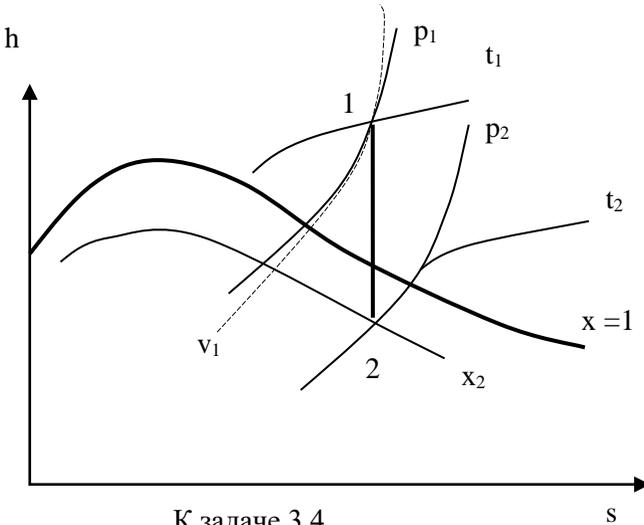
Построить процесс в h,s ; p,v ; и T,s – диаграммах.

Решение.

Расчет по h,s - диаграмме.

Адиабатный процесс совершается без подвода и отвода теплоты, и энтропия пара остается постоянной: $s_1 = s_2$.

По исходным данным p_1 , t_1 , p_2 строится процесс в $h-s$ диаграмме и определяются искомые параметры:



$s_1=6,65$ кДж/(кг·К), $t_2=83$ °С, $v_1=0,0575$ м³/кг, $v_2=2,75$ м³/кг,
 $h_1=3200$ кДж/кг, $h_2=2310$ кДж/кг.

Работа адиабатного процесса рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} \ell &= -\Delta u = u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 \cdot v_1) - (h_2 - p_2 \cdot v_2) = \\ &= (3200 - 5 \cdot 10^3 \cdot 0,0575) - (2310 - 50 \cdot 2,75) = 740,5 \text{ кДж/кг} \end{aligned}$$

Расчет по таблицам.

1. Определяется начальное состояние. Первая точка находится в области перегретого пара, так как $t_1=400$ °С > $t_s = 263,92$ °С.

При давлении $p_1=5 \cdot 10^6$ Па = 5 МПа и $t_1=400$ °С [4]

$$v_1=0,0578 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$h_1 = 3196,9 \text{ кДж/кг},$$

$$s_1 = 6,6486 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Внутреннюю энергию рассчитывают по формуле

$$u_1 = h_1 - p_1 \cdot v_1 = 3196,9 - 5 \cdot 10^3 \cdot 0,0578 = 2907,9 \text{ кДж/кг}.$$

2. Состояние рабочего тела во второй точке определяют, сравнивая энтропию $s_1 = s_2 = 6,6486 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ с энтропиями $s' = 1,0912$ и $s'' = 7,5951$, взятыми из таблицы 7 Приложения при $p_2 = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$.

Вторая точка находится в области влажного пара.

Степень сухости влажного пара рассчитывается по формуле:

$$x = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = \frac{6,6486 - 1,0912}{7,5951 - 1,0912} = 0,854.$$

Параметры v_2 , h_2 рассчитываются по формулам:

$$h_2 = h'' \cdot x + h' \cdot (1-x) = 2646 \cdot 0,854 + 340,57(1-0,854) = 2309,5 \text{ кДж/кг},$$

$$v_2 = v'' \cdot x + v' \cdot (1-x) = 3,2415 \cdot 0,854 + 0,00103(1-0,854) = 2,768 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$u_2 = h_2 - p_2 \cdot v_2 = 2309,5 - 50 \cdot 2,768 = 2171,1 \text{ кДж/кг}.$$

Из таблицы 7 Приложения при $p_2 = 5 \cdot 10^4 \text{ Па}$:

$$t_2 = t_s = 81,35^\circ\text{C}$$

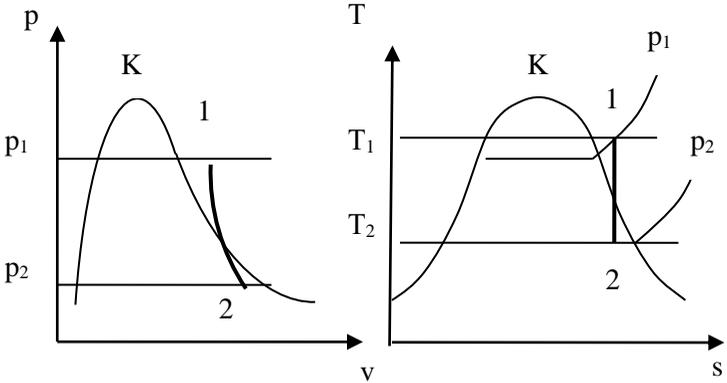
$$h' = 340,57 \text{ кДж/кг}, \quad h'' = 2646 \text{ кДж/кг},$$

$$v' = 0,00103 \text{ м}^3/\text{кг}, \quad v'' = 3,2415 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. Работа адиабатного процесса рассчитывается по формуле:

$$\ell = -\Delta u = u_1 - u_2 = 2907,9 - 2171,1 = 736,8 \text{ кДж/кг}.$$

Процесс в диаграммах строят по исходным данным.



К задаче 3.4.

3.3. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

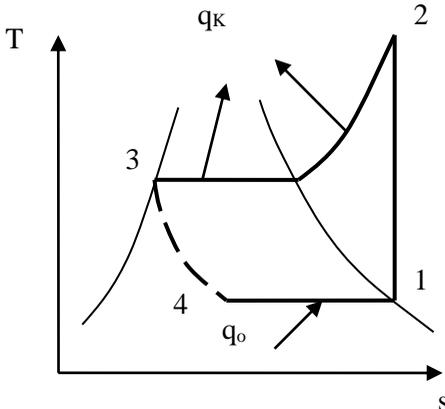
Циклы холодильных установок, в отличие от циклов тепловых двигателей, являются обратными.

Удельная холодопроизводительность холодильной установки q_o , кДж/кг:

$$q_o = h_1 - h_4.$$

Затрачиваемая работа (работа привода компрессора) $\ell_{ц}$, кДж/кг:

$$\ell_{ц} = h_2 - h_1.$$



Расход холодильного агента

$$m = Q_o/q_o,$$

где Q_o , кДж/с – холодопроизводительность установки
Эффективность циклов холодильных машин оценивается холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = q_o/\ell_{ц}.$$

Теоретическая мощность, необходимая для привода компрессора:

$$N = m \cdot \ell_{\text{ц}}$$

Холодильный коэффициент парокомпрессионной установки

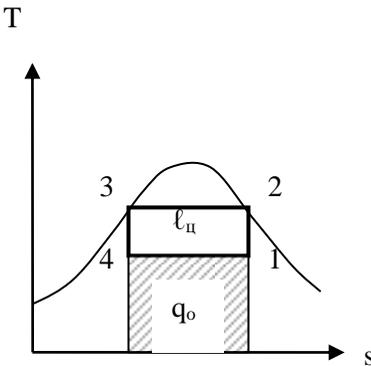
$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}$$

где h_1 и h_2 – энтальпии на входе и на выходе из компрессора;
 h_3 – энтальпия жидкого хладагента после конденсации ($h_3 = h_4$).

Данные о насыщенных парах хладона R-12 и аммиака приведены в таблицах 5 и 6 Приложения. При расчетах циклов холодильных машин между таблицами, приводимыми в разных литературных источниках и диаграммами для одного и того же вещества, могут быть существенные расхождения, поэтому необходимо указать источник.

Задачи

Задача 3.5. Пар аммиака при температуре $t_1 = -10$ °С поступает в компрессор, где адиабатно сжимается до давления, при котором его температура $t_2 = 20$ °С а степень сухости $x = 1$. Из компрессора аммиак поступает в конденсатор, где при постоянном давлении обращается в жидкость ($x=0$), после чего в расширительном цилиндре он адиабатно расширяется до температуры $t_4 = t_1 = -10$ °С. Определить холодильный коэффициент и работу сжатия в компрессоре на 1 кг хладагента.



К задаче 3.5.

Решение.

По таблице 6 Приложения при $t_1 = -10$ °С находим:

$$s' = 4,0164 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$s'' = 8,9438 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

при $t_1 = 20$ °С:

$$s' = 4,5155 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$s'' = 8,5658 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), r = 1186,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Процесс 1-2 адиабатный:

$$s_1 = s_2 = s''_2 = 8,5658 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

Процесс 3-4 адиабатный:

$$s_4 = s_3 = s'_3 = 4,5155 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$\Delta s = s_2 - s_3 = s_1 - s_4 = 8,5658 - 4,5155 = 4,0503 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Удельная холодопроизводительность аммиака:

$$q_0 = T_1(s_1 - s_4) = (-10 + 273) \cdot 4,0503 = 1065,23 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Тепловая нагрузка конденсатора:

$$q_K = h_2 - h_3 = r_2 = 1186,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Работа сжатия:

$$\ell_{\text{ц}} = q_K - q_0 = 1186,9 - 1065,23 = 121,67 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = q_0 / \ell_{\text{ц}} = 1065,23 / 121,67 = 8,76.$$

Задача 3.6. В схеме аммиачной холодильной установки, приведенной в предыдущем примере, расширительный цилиндр заменяется дросселем (редукционным вентилем). В остальном все условия задачи сохраняются. Определить холодильный коэффициент.

Решение.

В редукционном вентиле процесс 3-4 – процесс дросселирования при $h = \text{const}$. Энтропия при этом увеличивается.

По таблице 6 Приложения:

при $t_1 = -10^\circ\text{C}$:

$$h' = 372,6 \text{ кДж}/\text{кг}, h'' = 1669,3 \text{ кДж}/\text{кг},$$

при $t_1 = 20^\circ\text{C}$:

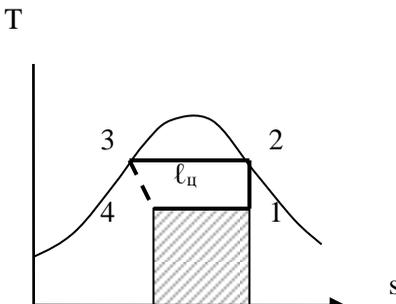
$$h' = 512,5 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Удельная холодопроизводительность:

$$q_0 = T_1(s_1 - s_4).$$

В процессе 1-2 постоянная энтропия:

$$s_1 = s_2 = s''_2 = 8,5658 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$



К задаче 3.6.

Энтропию в точке 4 можно определить, зная степень сухости x_4 :

$$s_4 = s'_4 + (s''_4 - s'_4) \cdot x_4.$$

Степень сухости определяется из условия $h_4 = h'_3$:

$$x_4 = \frac{h_4 - h'_4}{h''_4 - h'_4} = \frac{h'_3 - h'_4}{h''_4 - h'_4} = \frac{512,5 - 372,6}{1669,3 - 372,6} = 0,1079.$$

$$s_4 = 4,0169 + (8,9438 - 4,0169) \cdot 0,1079 = 4,549 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$q_o = T_1(s_1 - s_4) = 263 \cdot (8,5658 - 4,549) = 1056,42 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Тепловая нагрузка конденсатора:

$$q_k = h_2 - h_3 = r_2 = 1186,9 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Работа сжатия:

$$\ell_{\text{ц}} = q_k - q_o = 1186,9 - 1056,42 = 130,48 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{\ell} = \frac{1056,42}{130,48} = 8,096.$$

3.4. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Технические расчеты процессов с влажным воздухом производятся чаще всего с использованием h, d – диаграммы. Угол между осью энтальпии h (ординаты) и осью влагосодержания d (абсциссы) равен 135° .

На диаграмме нанесены:

- Изотермы - линии постоянной температуры $t = \text{const}$.
- Линии постоянной энтальпии $h = \text{const}$.
- Линии постоянной относительной влажности $\varphi = \text{const}$ – (эти линии изменяют характер при температуре насыщения).
- Линии постоянных значений температуры мокрого термометра $t_m = \text{const}$ (пунктирные линии).
- В нижней части диаграммы обычно представлена диаграмма парциального давления пара p_p .

На линии $\varphi = 100\%$ значения t и t_m совпадают.

В процессе изобарного нагрева влажного воздуха (процесс 1-2): влагосодержание воздуха d не изменяется ($d_1 = d_2$); относительная влажность φ уменьшается; энтальпия увеличивается.

h,d – диаграммы

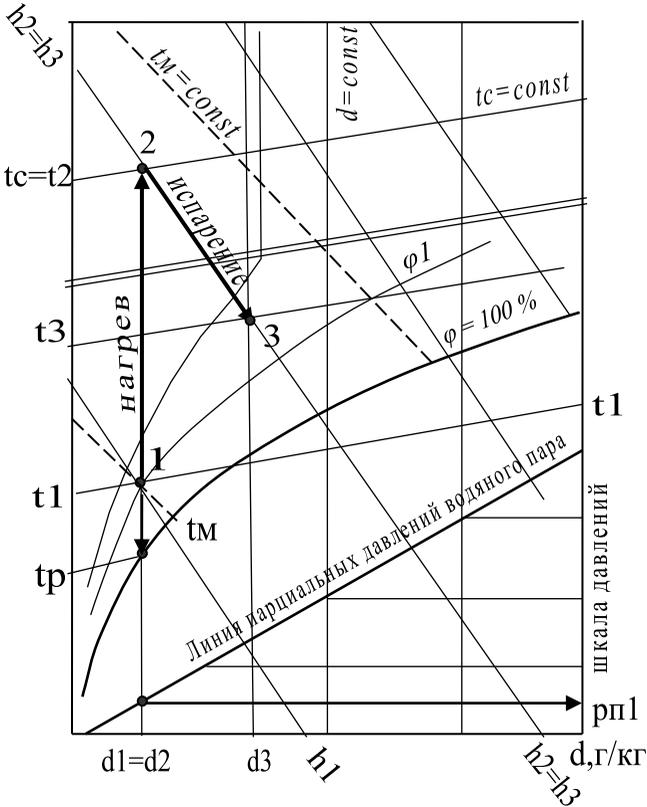


Рис. 3. Определение параметров влажного воздуха по h,d- диаграмме

Задачи

Задача 3.7. Для сушки используют воздух при $t_1=20^\circ\text{C}$ и $\varphi_1=60\%$. В калорифере его подогревают до $t_2 = 95^\circ\text{C}$ и направляют в сушилку, откуда он выходит при $t_3 = 35^\circ\text{C}$.

Вычислить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и теплоты на 1 кг испаренной влаги.

Решение. На h,d – диаграмме влажного воздуха точка 1 находится на пересечении линий $t_1=20^\circ\text{C}$ и $\varphi_1=60\%$. Определяем:

$$d_1 = 9 \text{ г/кг}; h_1 = 40 \text{ кДж/кг}.$$

Проведя линию $d = \text{const}$, находим на пересечении ее с изотермой $t_2 = 95^\circ\text{C}$ точку 2, характеризующую состояние воздуха на выходе из калорифера.

Из точки 2 проводим линию $h = \text{const}$ до пересечения с изотермой $t_3 = 35^\circ\text{C}$, где находим точку 3, характеризующую состояние воздуха на выходе из сушилки:

$$d_3 = 33 \text{ г/кг}; h_3 = 117,6 \text{ кДж/кг}.$$

Расход сухого воздуха, необходимого для испарения 1 кг влаги:

$$m = \frac{1000}{d_3 - d_1} = \frac{1000}{(32 - 9)} = 41,7 \text{ кг}.$$

Расход теплоты в калорифере на 1 кг сухого воздуха:

$$\Delta h = (h_3 - h_1) = 117,6 - 40 = 77,6 \text{ кДж/кг}.$$

Расход теплоты на 1 кг испаренной влаги (на 41,7 кг сухого воздуха) составит:

$$q = m \cdot \Delta h = 77,6 \cdot 41,7 = 3236 \text{ кДж/кг}.$$

3.5. РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Обозначения:

Q , Вт - тепловой поток;

F , м^2 - площадь; l , м - длина;

$q = Q/F$, Вт/м^2 - плотность теплового потока;

$q_l = Q/l$, Вт/м - линейная плотность теплового потока;

t_1 , t_2 , или t_c , $^\circ\text{C}$ - температуры на поверхностях стенки;

$t_{ж1}$, $t_{ж2}$, $^\circ\text{C}$ - температуры горячей и холодной сред;

δ , м - толщина плоской стенки;

d , м - диаметр; R , $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ - термическое сопротивление;

λ , $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; - коэффициент теплопроводности стенки;

α , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ - коэффициент теплоотдачи;

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

Плоская стенка.

Формулы расчета теплового потока для плоской стенки при граничных условиях 1 рода.

многослойная стенка:

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{t_1 - t_2}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}.$$

Теплопередача через плоскую стенку от одной среды к другой (граничные условия 3 рода):

$$q = \kappa \cdot (t_{ж_1} - t_{ж_2});$$

Однослойная стенка

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

Многослойная стенка:

$$\kappa = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Температура на поверхности стенки определяется из уравнения Ньютона-Рихмана:

$$q = \alpha (t_{ж} - t_c).$$

Цилиндрическая стенка.

Теплопроводность при граничных условиях 1 рода.

Многослойная стенка:

$$q_\ell = \frac{\pi(t_1 - t_2)}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{\pi(t_1 - t_{n+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}.$$

Теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку:

$$q_\ell = \pi \cdot \kappa_\ell \cdot (t_{ж_1} - t_{ж_2});$$

$$\kappa_\ell = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{n+1}}}$$

Температуры на поверхностях цилиндрической стенки t_{c1} , t_{c2} определяются из уравнений:

$$q_\ell = \pi d_1 \alpha_1 (t_{ж_1} - t_{c1}); \quad q_\ell = \pi d_2 \alpha_2 (t_{c2} - t_{ж_2}).$$

3.6. РАСЧЕТ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ СВОБОДНОЙ И ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИЯХ

Тепловой поток при конвективном теплообмене между жидкостью или стенкой определяется по уравнению Ньютона – Рихмана:

$$Q = \alpha (t_{\text{ж}} - t_{\text{с}}) F,$$

где α , Вт/(м²·К) – коэффициент теплоотдачи;

$t_{\text{с}}$, $t_{\text{ж}}$ – температуры стенки и среды (жидкости) соответственно.

Конвективный теплообмен может осуществляться при свободном и вынужденном движении среды относительно стенки. Теплообмен при этом протекает по-разному.

Основные числа подобия:

Критерий Нуссельта

$$Nu = (\alpha \cdot \ell_0) / \lambda.$$

Критерий Рейнольдса

$$Re = (w \cdot \ell_0) / \nu.$$

Критерий Прандтля

$$Pr = \nu / a.$$

Значения Pr приводятся в таблице.

Критерий Грасгофа
$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot \ell_0^3}{\nu_{\text{ж}}^2}.$$

где ℓ_0 , м - определяющий геометрический размер (для горизонтальной трубы - диаметр d , для вертикальной пластины – высота).

Определяющая температура - средняя температура жидкости $t_{\text{ж}}$, ($Pr_{\text{с}}$ определяется по $t_{\text{с}}$).

λ , Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности среды;

a , м²/с - коэффициент температуропроводности;

w , м/с – скорость потока;

ν , м²/с – кинематический коэффициент вязкости;

$g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

β , 1/К – термический коэффициент объемного расширения (для газов: $\beta = 1/(t_{ж} + 273)$; для жидкостей берется из таблиц); $\Delta t = t_c - t_{ж}$ - температурный напор, К.

Коэффициент теплоотдачи α определяется по критериальным уравнениям.

Для свободной конвекции в большом объеме:

$$Nu_{ж} = C (Gr_{ж} \cdot Pr_{ж})^m (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}.$$

В таблице 3 приведены значения величин C и m для различных условий теплообмена.

Таблица 3

Вид поверхности	C	m	Допустимый диапазон
Горизонтальные трубы: ламинарный режим	0,5	0,25	$10^3 < Gr_{ж,d} Pr_{ж} < 10^8$
Вертикальные трубы и плоские вертикальные поверхности: ламинарный режим			
турбулентный режим	0,75	0,25	$10^3 < Gr_{ж,t} Pr_{ж} < 10^9$
	0,15	0,33	$Gr_{ж,t} \cdot Pr_{ж} > 10^9$

Для вынужденной конвекции

$$Nu_{ж} = B Re_{ж}^n Pr_{ж}^m (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}.$$

Таблица 4

Вид движения теплоносителя	B	n	m
Турбулентное движение около горизонтальной пластины ($Re_{ж,x} > 10^5$)	0,037	0,8	0,43
Ламинарное движение около горизонтальной пластины ($Re_{ж,x} < 10^5$)	0,66	0,5	0,43
Турбулентное движение в трубе ($Re_{ж,d} > 10^4$)	0,021	0,8	0,43
*Ламинарное движение в трубе ($Re_{ж,d} < 2300$)	0,15	0,33	0,43
Поперечное обтекание трубы: при $5 < Re_{ж,d} < 10^3$	0,5	0,5	0,38
при $10^3 < Re_{ж,d} < 2 \cdot 10^5$	0,25	0,6	0,38
при $3 \cdot 10^5 < Re_{ж,d} < 2 \cdot 10^6$	0,023	0,8	0,37

При ламинарном движении в трубах для расчета теплоотдачи применяется формула:

$$Nu_{ж,d} = B \cdot Re_{ж,d}^n \cdot Pr_{ж}^m \cdot Gr_{ж,d}^{0,1} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25}$$

Тепловой поток:
через 1 м² стенки

$$q = \alpha (t_c - t_{ж}),$$

от 1 погонного метра цилиндрической трубы

$$q_l = \pi \cdot d \alpha (t_c - t_{ж}).$$

Задача 3.8. Температура поверхности вертикальной стенки высотой $h = 3$ м равна 10°C . Температура воздуха в помещении 20°C . Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке.

Решение. Теплообмен осуществляется при свободной конвекции. Определяем значение критериев $Gr_{ж}$ и $Pr_{ж}$.

По температуре воздуха 20°C из таблицы 3 Приложения выбираем для воздуха:

$$v_{ж} = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\lambda_{ж} = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}),$$

$$Pr_{ж} = 0,703,$$

$$Pr_{ст} = 0,705 \text{ (при температуре стенки } 10^\circ\text{C}).$$

$$Gr_{ж} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot h^3}{v_{ж}^2} = \frac{9,81 \cdot (20 - 10) \cdot 3^3}{(273 + 20) \cdot (15,06 \cdot 10^{-6})^2} = 3,98 \cdot 10^{10};$$

$$Gr_{ж} \cdot Pr_{ж} = 3,98 \cdot 0,703 = 2,79 \cdot 10^{10}.$$

Режим движения турбулентный ($Gr_{ж} \cdot Pr_{ж} > 10^9$).

$$Nu_{ж} = 0,15 (Gr_{ж} \cdot Pr_{ж})^{0,33} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} = 0,15 (2,79 \cdot 10^{10})^{0,33} (0,703/0,705)^{0,25} = 423$$

$$\alpha = \frac{Nu_{ж} \cdot \lambda_{ж}}{h} = \frac{423 \cdot 0,0259}{3} = 3,66 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}).$$

3.7. ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

Основными уравнениями для теплового расчета теплообменных аппаратов являются уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

Уравнение теплового баланса.

Теплота, передаваемая от горячего теплоносителя к холодному (без учета тепловых потерь в окружающую среду):

$$Q = m_1 (h'_1 - h''_1) = m_2 (h''_2 - h'_2),$$

где m_1, m_2 кг/с – массовые расходы горячего и холодного теплоносителей соответственно;

h'_1, h''_1 , кДж/кг – энтальпия горячего теплоносителя на входе и на выходе теплообменника;

h'_2, h''_2 , кДж/кг – энтальпия холодного теплоносителя на входе и на выходе;

Для теплообменников, в которых теплоносители не изменяют своего агрегатного состояния (не испаряются и не конденсируются, а только нагреваются или охлаждаются), уравнение теплового баланса может быть записано в виде:

$$Q = m_1 c_{p1} (t'_1 - t''_1) = m_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2),$$

где c_{p1}, c_{p2} , кДж/(кг·К) – изобарные теплоемкости теплоносителей,

t'_1, t''_1, t'_2, t''_2 – температуры первого и второго теплоносителей соответственно на входе и на выходе.

При изменении агрегатного состояния первого теплоносителя:

$$Q = m_1 (h'_1 - h''_1) = m_2 c_{p2} (t''_2 - t'_2).$$

Уравнение теплопередачи через стенку

$$Q = k \cdot \Delta t_{cp} \cdot F,$$

где $F, \text{м}^2$ – площадь поверхности теплообмена;

$k, \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ – коэффициент теплопередачи от горячего теплоносителя к холодному через стенку;

Δt_{cp} – средний температурный напор.

Средний температурный напор зависит от схемы движения теплоносителей (прямоток, противоток, перекрестный ток).

Он рассчитывается по формуле:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}},$$

где $\Delta t_6, \Delta t_m$ – большая и меньшая разности температур на концах теплообменника.

В случае, если $\Delta t_6/\Delta t_m < 2$, для расчетов можно использовать среднеарифметический температурный напор:

$$\Delta t_{cp} = (\Delta t_6 + \Delta t_m)/2.$$

По уравнению теплового баланса рассчитывают тепловой поток Q , Вт, по уравнению теплопередачи – площадь поверхности теплообмена F , м².

Уравнение массового расхода теплоносителя:

$$m = w \cdot \rho \cdot f, \text{ кг/с},$$

где w , м/с – скорость движения теплоносителя,
 f , м² – площадь поперечного сечения потока,
 ρ , кг/м³ – плотность теплоносителя.

Задача 3.9. Водовоздушный нагреватель выполнен из стальных ($\lambda = 45$ Вт/(м·К)) труб диаметром 38×3 мм. Греющая среда – воздух с температурой на входе $t'_1 = 350$ °С и на выходе $t''_1 = 250$ °С. Нагреваемая вода имеет расход $m = 2$ т/ч, начальную температуру $t'_2 = 30$ °С, и конечную $t''_2 = 200$ °С. Коэффициенты теплоотдачи от воздуха к трубам $\alpha_1 = 30$ Вт/(м²·К), от труб к воде $\alpha_2 = 2000$ Вт/(м²·К).

Найти площадь поверхности нагрева аппарата, если он выполнен по противоточной схеме. Учесть загрязнение поверхности с одной стороны накипью толщиной 0,5 мм и с другой стороны – слоем масла толщиной 0,1 мм. Нагреватель теряет в окружающую среду 5% теплоты, получаемой с водой. Расчет произвести по формулам плоской стенки.

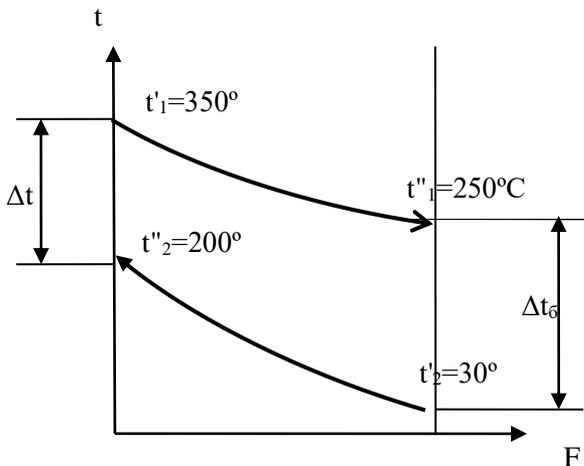
Решение.

Уравнение теплового баланса:

$$Q = 0,95 \cdot m_2 \cdot c_{p2} (t''_2 - t'_2) = 0,95 \cdot 2 \cdot 1000/3600 \cdot 4,19 \cdot (200 - 30) = 375,94 \text{ кВт}$$

Площадь поверхности нагрева аппарата находим из уравнения теплопередачи:

$$F = Q / (k \cdot \Delta t_{cp})$$



К задаче 3.9.

Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м²К):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_H}{\lambda_H} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{30} + \frac{0,0005}{1,75} + \frac{0,003}{45} + \frac{0,0001}{0,15} + \frac{1}{2000}} = 28,69$$

Средний температурный напор Δt_{cp} , °С:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_δ - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_δ}{\Delta t_m}} = \frac{220 - 150}{\ln \frac{220}{150}} = 182,77$$

Температурные напоры определены по формулам:

$$\Delta t_δ = t''_1 - t'_2 = 250 - 30 = 220 \text{ °С},$$

$$\Delta t_m = t''_2 - t'_1 = 350 - 200 = 150 \text{ °С}.$$

$$F = Q / (k \cdot \Delta t_{cp}) = 375,94 \cdot 10^3 / (28,69 \cdot 182,77) = 71,6 \text{ м}^2.$$

4. КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

К решению задач следует приступить только после того, как будет изучен соответствующий раздел курса. Перед выполнением контрольной работы рекомендуется ознакомиться с ходом решения аналогичных задач по учебной литературе.

Студенты, фамилии которых начинаются с букв от А до Л, выполняют задачи по варианту А, а студенты, фамилии которых начинаются с букв от М до Я, выполняют задачи по варианту Б.

Контрольная работа содержит сто вариантов. В каждой задаче исходные данные выбираются из соответствующих таблиц по последней и предпоследней цифре учебного шифра студента (две последние цифры номера зачетной книжки). Варианты работы должны соответствовать шифру студента. Шифр указывается на обложке тетради. Работы, выполненные не по своему шифру, не рассматриваются. При выполнении контрольных задач необходимо соблюдать следующий порядок:

1. Выписать условия задачи и исходные данные;
2. Решение задач сопровождать кратким пояснением.

При использовании данных, взятых из таблиц или диаграмм, должно быть дано точное библиографическое описание источника. Полный список использованной литературы приводится в конце работы.

3. Вычисления необходимо выполнять в системе СИ, проставлять размерности.

Задача А – 1

V_1 , м³ газа с начальным давлением p_1 и начальной температурой t_1 сжимается до изменения объёма в ε раз ($\varepsilon = V_1/V_2$).

Сжатие происходит по изотерме, адиабате и политропе с показателем политропы n . Определить массу газа, конечный объём, температуру, работу сжатия, количество отведённой теплоты, изменение внутренней энергии и энтропии газа для каждого из процессов.

Изобразить процессы сжатия в p, v и T, s – диаграммах. Данные для решения приведены в таблице 6. Результаты расчетов свести в таблицу 5.

Таблица 5

Процесс	m	T	L	Q	ΔU	ΔS
	кг	Т	кДж	кДж	кДж	кДж/К
Изотермический						
Адиабатный						
Политропный						

Таблица 6

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ	CO ₂	N ₂	H ₂	O ₂	CH ₄	NH ₃	H ₂ O	N ₂	CO ₂	O ₂
V_1 , м ³	50	55	60	65	70	45	40	30	50	60
p_1 , МПа	0,1	0,15	0,17	0,12	0,11	0,14	0,18	0,2	0,19	0,1
Пред-последняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ε	10	8	7	12	15	17	10	13	9	15
t_1 , °С	10	15	17	20	25	30	5	15	25	35
n	1,1	1,15	1,2	1,25	1,25	1,22	1,18	1,28	1,26	1,2

Задача Б – 1

m кг воздуха с начальной температурой t_1 сжимается от давления $p_1=0,1$ МПа до давления p_2 . Сжатие происходит по изотерме, адиабате и политропе с показателем политропы n .

Определить для каждого из трёх процессов сжатия конечную температуру воздуха, работу, отведённое тепло, изменение внутренней энергии и энтропии воздуха. Изобразить процессы сжатия в p, v и T, s – диаграммах. Данные для решения приведены в таблице 8. Результаты расчетов свести в таблицу 7.

Таблица 7

Процесс	m	T	L	Q	ΔU	ΔS
	кг	T	кДж	кДж	кДж	кДж/К
Изотермический						
Адиабатный						
Политропный						

Таблица 8

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
n	1,25	1,22	1,32	1,28	1,2	1,23	1,27	1,25	1,33	1,3
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_2, \text{МПа}$	1,0	0,9	0,85	0,8	0,95	0,9	0,85	0,8	0,9	0,8
$m, \text{кг}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

Задача А - 2

Рабочее тело – водяной пар, имеющий в начальном состоянии давление p_1 и температуру t_1 адиабатно расширяется до давления p_2 .

Построить процесс адиабатного расширения водяного пара в h,s - диаграмме.

Определить:

- 1) параметры пара в начальном состоянии (v_1, h_1, s_1);
- 2) параметры пара в конечном состоянии (v_2, h_2, s_2);
- 3) значения внутренней энергии пара до и после процесса расширения;

- 4) работу расширения и количество отводимой теплоты.

К решению задачи приложить схему построения процесса в координатах h,s . Данные для решения приведены в таблице 9.

Таблица 9

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_1 , МПа	5	8	9	10	13	5	9	8	11	12
p_2 , бар	0,6	0,5	0,20	1,5	0,9	0,7	1,0	0,7	2,0	3,0
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_1 , °С	400	470	490	550	600	410	500	450	490	550

Задача Б – 2

Рабочее тело – водяной пар, имеющий в начальном состоянии давление p_1 и степени сухости x_1 , изобарно нагревается до температуры t_2 . Построить процесс нагрева водяного пара в диаграмме h,s .

Определить:

- 1) параметры пара в начальном состоянии (v_1, h_1, s_1);
- 2) параметры пара в конечном состоянии (v_2, h_2, s_2);
- 3) значения внутренней энергии пара до и после процесса нагрева;
- 4) количество подведенной теплоты и совершаемую работу.

К решению задачи приложить схему построения процесса в координатах h,s . Данные для решения приведены в таблице 10.

Таблица 10

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p , МПа	9	8	7	6	5	4	3	2,5	1	1,4
x	0,95	0,94	0,96	0,93	0,97	0,92	0,90	0,91	0,98	0,89
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t , °С	400	420	500	530	580	600	610	550	640	650

Задача А – 3

Пар хладона R-12 при температуре t_1 поступает в компрессор, где изоэнтропно сжимается до давления, при котором его температура становится равной t_2 , а сухость пара $x_2=1$. Из компрессора хладон поступает в конденсатор, где при постоянном давлении превращается в жидкость, после чего адиабатно расширяется в дросселе до температуры $t_4=t_1$.

Определить холодильный коэффициент установки, массовый расход хладона, а также теоретическую мощность привода компрессора, если холодопроизводительность установки Q_0 . Изобразить схему установки и её цикл в T,s – диаграмме. Данные для решения приведены в таблице 11.

Таблица 11

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-20	-15	-20	-10	-20	-10	-15
$t_2, ^\circ\text{C}$	15	20	25	10	30	15	20	25	10	30
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_0, \text{кВт}$	150	200	170	190	260	300	280	130	240	250

Задача Б – 3

Аммиачная холодильная установка при температуре кипения хладагента t_1 и температуре его конденсации t_2 имеет холодопроизводительность Q_0 .

Определить холодильный коэффициент установки, массовый расход хладагента, а также теоретическую мощность привода компрессора, если известно, что пар аммиака после компрессора становится сухим насыщенным. Изобразить схему установки и её цикл в T,s – диаграмме. Данные для решения приведены в таблице 12.

Таблица 12

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	-20	-15	-10	-15	-20	-15	-10	-15	-20	-10
$t_2, ^\circ\text{C}$	25	20	15	15	30	15	20	25	10	30
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q_0, \text{кВт}$	150	200	190	170	260	125	280	130	300	250

Задача А – 4

В баке с водой установлен паровой подогреватель, который представляет собой горизонтальный змеевик из труб диаметром d . Температура воды в баке $t_{ж}$, средняя температура поверхности нагревателя $t_{ст}$.

Определить коэффициент теплоотдачи от нагревателя к воде. Каким будет коэффициент теплоотдачи, если в бак установить мешалку, создающую перпендикулярный оси нагревателя поток жидкости со скоростью w ? Данные для решения приведены в таблице 13.

Таблица 13

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	10	16	20	28	32	38	42	48	57	75
$t_{ст}$, °С	80	85	90	95	100	105	110	120	130	140
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{ж}$, °С	20	30	40	50	60	70	65	55	45	35
w , м/с	2,25	2,5	2,75	2,0	1,25	3,5	3,75	2,0	2,25	2,5

Задача Б - 4

Изолированный горизонтальный трубопровод проложен на открытом воздухе, температура которого $t_{ж}$. Температура наружной поверхности изоляции равна $t_{ст}$, наружный диаметр изоляции равен d .

Определить коэффициент теплоотдачи и тепловые потери с 1м длины трубопровода. Во сколько раз возрастут тепловые потери, если трубопровод будет обдуваться поперечным потоком воздуха со скоростью w ? Данные для решения приведены в таблице 14.

Таблица 14

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мм	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
$t_{ж}$, °С	-35	-25	-20	-15	-10	-5	0	10	15	10
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_{ст}$, °С	40	45	55	60	65	50	35	25	20	70
w , м/с	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Задача А – 5

В паровом подогревателе вода нагревается от температуры t' до температуры t'' . Определить поверхность нагрева подогревателя и расход пара для противоточной схемы движения теплоносителей, если:

- давление пара p , степень сухости его x ;
- температура конденсата t_k ;
- производительность аппарата по воде m ;
- коэффициент теплоотдачи со стороны пара α_1 , со стороны воды α_2 .

Толщина стальной стенки теплообменника 3 мм. Стенка покрыта слоем накипи толщиной 0,5 мм.

Коэффициент полезного использования теплоты η_m .

Теплоёмкость воды: $c_B = 4,19$ кДж/(кг·К).

Коэффициенты теплопроводности:

стали $\lambda_{СТ} = 45$ Вт/(м·К), накипи $\lambda_{Н} = 1,75$ Вт/(м·К). Данные для решения приведены в таблице 15.

Таблица 15

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
x	0,92	0,9	0,91	0,95	0,94	0,93	0,9	0,95	0,96	0,91
t_k , °С	100	120	127	129	132	135	125	130	140	150
m , кг/с	7	5,6	4,0	4,7	6,4	7,5	8	5	4,4	8,1
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t' , °С	5	4	3	2	6	7	5	3	4	6
t'' , °С	65	66	64	63	65	67	64	62	68	70

Продолжение таблицы 15

$\alpha_1,$ кВт/(м ² ·К)	3,1	3,0	2,8	3,1	2,7	2,5	2,7	3,2	3,0	2,9
$\alpha_2,$ кВт/(м ² ·К)	1,5	1,6	1,4	1,8	1,3	1,7	2,0	1,9	2,1	1,6
η_m	0,94	0,93	0,9	0,92	0,91	0,95	0,9	0,94	0,92	0,95

Задача Б - 5

Определить поверхность нагрева противоточного подогревателя молока, а также расход греющей воды, если заданы:

- температура молока на входе в подогреватель t'_2 ;
 - температура молока на выходе из подогревателя - t''_2 ;
 - температуры греющей воды на входе и выходе - соответственно t'_1 и t''_1 ;
 - производительность аппарата по молоку – m ;
 - коэффициенты теплоотдачи: со стороны молока α_2 ; со стороны воды α_1 .
- коэффициент полезного использования тепла η_m .

Толщина стальной стенки теплообменника 3,5 мм.

Стенка покрыта слоем накипи толщиной 1,0 мм.

Теплоёмкость воды: $c_B = 4,19$ кДж/(кг·К);

теплоёмкость молока: $c_M = 3,6$ кДж/(кг·К).

Коэффициенты теплопроводности:

нержавеющей стали - $\lambda_{СТ} = 18$ Вт/(м·К), накипи - $\lambda_H = 1,75$ Вт/(м·К). Данные для решения приведены в таблице 16.

Таблица 16

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t'_1, ^\circ\text{C}$	98	100	95	94	93	99	100	95	98	96
$t''_1, ^\circ\text{C}$	70	65	64	67	68	71	72	69	65	60

Продолжение таблицы 16

$m, \text{ кг/с}$	1,4	1,1	0,8	1,7	2	0,6	1,4	1,1	0,8	0,6
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t'_2, \text{ }^\circ\text{C}$	5	7	6	8	9	4	10	8	7	6
$t''_2, \text{ }^\circ\text{C}$	50	55	53	60	54	55	60	52	51	50
$\alpha_1, \text{ кВт/(м}^2\cdot\text{К)}$	2,5	2,6	2,8	2,7	2,0	2,4	3,1	3,0	3,5	2,4
$\alpha_2, \text{ кВт/(м}^2\cdot\text{К)}$	2,0	2,1	1,4	1,5	1,3	1,6	1,8	1,3	1,8	1,6
η_m	0,78	0,76	0,79	0,8	0,85	0,84	0,82	0,83	0,8	0,81

Задача А-6

Для сушки используют воздух с температурой t_1 и с заданной относительной влажностью φ_1 . В калорифере его подогревают до температуры t_2 и направляют в сушилку, откуда он выходит с температурой t_3 . Определить:

1) основные параметры влажного воздуха (t_m, φ, d, h, p_p) для основных точек процессов;

2) расход воздуха M и теплоты q на 1 кг испаренной влаги.

Изобразить процесс в h,d -диаграмме. Данные для решения приведены в таблице 17. Результаты расчетов свести в таблицу 18.

Таблица 17

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	20	16	15	23	26	15	18	22	25	17
$\varphi, \%$	70	75	60	65	60	80	80	82	75	85
$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	90	125	130	115	140	145	115	120	128	132
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_3, \text{ }^\circ\text{C}$	40	50	62	55	58	48	55	57	51	53

Таблица 18

Точки	t_m	φ	d	h	p_n	M	q
	$^{\circ}\text{C}$	%	г/кг	кДж/кг	кПа	кг	кДж/кг
1							
2							
3							

Задача Б-6

Для сушки используют воздух с температурой t_1 и t_m . В калорифере его подогревают до температуры t_2 и направляют в сушилку, откуда он выходит с температурой t_3 .

Определить:

1) параметры влажного воздуха (φ , d , h , P_n) для основных точек процессов;

2) расход воздуха M и теплоты q на 1 кг испаренной влаги. Изобразить процесс в h,d -диаграмме. Данные для решения приведены в таблице 19. Результаты расчетов свести в таблицу 20.

Таблица 19

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^{\circ}\text{C}$	20	16	15	23	26	19	18	22	25	17
$t_m, ^{\circ}\text{C}$	18	14	13	20	23	17	16	20	22	15
$t_2, ^{\circ}\text{C}$	90	110	125	135	140	130	155	150	120	145
Предпоследняя цифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_3, ^{\circ}\text{C}$	40	50	54	57	65	58	68	57	52	53

Таблица 20

Точки	φ	d	h	P_n	M	q
	%	г/кг	кДж/кг	кПа	кг	кДж/кг
1						
2						
3						

5. ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

А). Термодинамика.

1. Термодинамические системы и их классификация. Рабочее тело.
2. Теплота и работа как формы передачи энергии. Параметры состояния. Уравнение состояния. Уравнение состояния идеального газа.
3. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные, обратимые и необратимые процессы.
4. Газовые смеси. Способы задания состава смеси. Соотношение между массовыми и объемными долями. Кажущаяся молекулярная масса. Газовая постоянная смеси. Парциальное давление компонента смеси.
5. Теплоемкость. Массовая, объемная теплоемкость. Средняя и истинная теплоемкость. Теплоемкость при постоянном объеме. Теплоемкость при постоянном давлении. Уравнение Майера. Зависимость теплоемкости от температуры.
6. Первый закон термодинамики.
7. Теплота и работа.
8. Внутренняя энергия.
9. Выражение теплоты и работы через термодинамические параметры состояния.
10. Энтальпия.
11. Анализ изохорного и изобарного процессов. Изображение процессов на p, v и T, s -диаграммах.
12. Анализ изотермического и адиабатного процессов. Изображение процессов на p, v и T, s -диаграммах.
13. Анализ политропного процесса. Уравнение политропы. Изображение процесса на p, v и T, s -диаграммах.
14. Второй закон термодинамики. Основные формулировки. Циклы.
15. Прямые и обратные циклы. Термический КПД и холодильный коэффициент.
16. Аналитическое выражение второго закона термодинамики.

17. Цикл Карно. Термический КПД и холодильный коэффициент цикла Карно.

18. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Цикл Отто (подвод теплоты при $v=\text{const}$). Анализ цикла. Изображение цикла в p, v и T, s – диаграммах. Индикаторная диаграмма.

19. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Цикл Дизеля (подвод теплоты при $p=\text{const}$). Анализ цикла. Изображение цикла в p, v и T, s – диаграммах. Индикаторная диаграмма.

20. Водяной пар. Основные определения. Фазовые переходы. Фазовые диаграммы. Тройная и критическая точки водяного пара.

21. Термодинамические таблицы воды и водяного пара. Расчет процессов водяного пара с помощью таблиц.

22. p, v ; и T, s - диаграммы воды и водяного пара.

23. h, s - диаграммы воды и водяного пара. Расчет процессов водяного пара с помощью h, s – диаграммы.

24. Дросселирование газов и паров.

25. Паросиловая установка. Принципиальная схема. Цикл Ренкина. Изображение цикла в p, v ; T, s и h, s - диаграммах. КПД цикла.

26. Методы повышения КПД.

27. Влажный воздух. Основные определения. h, d - диаграмма влажного воздуха.

28. Процессы влажного воздуха.

29. Холодильные установки. Схема и цикл парокомпрессионной холодильной установки. Изображение цикла в $T-s$ диаграмме.

30. Холодильный коэффициент и холодопроизводительность установки.

31. Холодильные агенты и их свойства.

В). Теплообмен.

32. Теплообмен. Виды переноса теплоты. Основные понятия и определения.

33. Теплопроводность. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Градиент температуры.

34. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности.
35. Теплопроводность однослойной и многослойной плоской стенках при граничных условиях 1 рода.
36. Теплопроводность однослойной и многослойной цилиндрической стенках при граничных условиях 1 рода.
37. Теплопередача через однослойную и многослойную цилиндрические стенки (граничные условия 3 рода). Коэффициент теплопередачи.
38. Конвективный теплообмен. Особенности движения жидкостей и газов. Свободная и вынужденная конвекции. Уравнение Ньютона – Рихмана. Коэффициент теплоотдачи.
39. Основы теории подобия. Критериальные уравнения. Физический смысл основных критериев подобия.
40. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах.
41. Теплоотдача при поперечном омывании одиночной круглой трубы.
42. Теплоотдача при свободном движении жидкости. Расчет коэффициента теплоотдачи.
43. Теплообмен излучением. Общие понятия и определения.
44. Основные законы теплового излучения.
45. Теплообмен излучением между телами, разделенными прозрачной средой.
46. Теплообменные аппараты. Основные схемы движения теплоносителей в теплообменниках.
47. Уравнения теплового баланса и теплопередачи.
48. Средний температурный напор. Основы теплового расчета теплообменных аппаратов.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Теплофизические свойства некоторых газов

Газ	Химическая формула	Молекулярная масса	Газовая постоянная R, Дж/(кг·К)	Плотность, кг/м ³
Воздух	-	28,96	286,4	1,293
Кислород	O ₂	32,00	259,8	1,429
Азот	N ₂	28,02	296,7	1,251
Водород	H ₂	2,016	4124,0	0,0899
Оксид углерода	CO	28,00	297,0	1,250
Двуокись углерода	CO ₂	44,00	189,0	1,977
Метан	CH ₄	16,04	518,3	0,717
Аммиак	NH ₃	17,03	488,16	0,771
Водяной пар	H ₂ O	18,02	(461,5)	(0,598)

Таблица 2

Мольная теплоёмкость газов, кДж/(кмоль·К)
и показатель адиабаты

Газ	μ_{Cv}	μ_{Cp}	k
Одноатомный	12,6	20,9	1,67
Двухатомный (в том числе воздух)	20,9	29,3	1,4
Трёх-и многоатомный	29,3	37,7	1,29

Таблица 3

Физические свойства сухого воздуха
(при давлении $1,013 \cdot 10^5$ Па)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг К)	$\lambda \times 10^2$, Вт/(м · К)	$\mu \times 10^6$, Па · с	$\nu \times 10^6$, м ² /с	Pr
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	0,694

Таблица 4

Физические свойства воды на линии насыщения

t, °C	ρ , кг/м ³	$\lambda \times 10^2$, Вт/(м · К)	$\nu \times 10^6$, м ² /с	$\beta \times 10^4$, К ⁻¹	Pr
0	999,9	55,1	1,789	-0,63	13,67
10	999,7	57,4	1,306	0,70	9,52
20	998,2	59,9	1,006	1,82	7,02
30	995,7	61,8	0,805	3,21	5,42
40	992,2	63,5	0,659	3,87	4,31
50	988,1	64,8	0,556	4,49	3,54
60	983,2	65,9	0,478	5,11	2,98
70	977,8	66,8	0,415	5,70	2,55
80	971,8	67,4	0,365	6,32	2,21
90	965,3	68,0	0,326	6,95	1,95
100	958,4	68,3	0,295	7,52	1,75
110	951,0	68,5	0,272	8,08	1,60
120	943,1	68,6	0,252	8,64	1,47
130	934,8	68,6	0,233	9,19	1,36
140	926,1	68,5	0,217	9,72	1,26

Таблица 5

Термодинамические свойства хладона R-12
в состоянии насыщения [4]

t, °C	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
-20	381,38	542,96	161,58	3,930	4,568
-15	385,98	545,26	159,28	3,948	4,565
-10	390,63	547,55	156,92	3,965	4,563
-5	395,30	549,82	154,52	3,983	4,559
0	400,00	552,06	152,06	4,000	4,557
5	404,75	554,28	149,53	4,017	4,555
10	409,54	556,45	146,92	4,034	4,553
15	414,36	558,59	144,23	4,051	4,551
20	419,22	560,69	141,46	4,067	4,550
25	424,13	562,73	138,81	4,084	4,549
30	429,08	564,72	135,64	4,099	4,547

Таблица 6

Термодинамические свойства аммиака
в состоянии насыщения [4]

t, °C	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	г, кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
-20	327,4	1655,9	1328,97	3,8410	9,0895
-15	350,0	1662,6	1312,06	3,9293	9,0150
-10	372,6	1669,3	1294,48	4,0164	8,9438
-5	395,6	1675,1	1276,25	4,1022	8,8756
0	418,7	1681,0	1257,38	4,1868	8,8096
5	441,7	1686,4	1237,89	4,2705	8,7458
10	465,2	1691,0	1217,80	4,3530	8,6838
15	488,6	1695,6	1197,12	4,4346	8,6240
20	512,5	1699,4	1186,9	4,5155	8,5658
25	536,3	1703,2	1154,10	4,5954	8,5092
30	581,1	1705,7	1131,78	4,6746	8,4563

Таблица 7

Термодинамические свойства воды и водяного пара в состоянии насыщения (по давлениям)

р, МПа	t _{нас} °С	v' м ³ /кг	v'' м ³ /кг	h' кДж/кг	h'' кДж/кг	г кДж/кг	s' кДж/(кг·К)	s'' кДж/(кг·К)
0,001	6,98	0,00100	129,21	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756
0,0015	13,03	0,00100	87,982	54,71	2525,0	2470,3	0,1956	8,8278
0,002	17,51	0,00100	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
0,0025	21,09	0,00100	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431
0,003	24,10	0,00100	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,0035	26,69	0,00100	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224
0,004	28,98	0,00100	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,0045	31,03	0,00101	31,142	129,98	2557,8	2427,8	0,4507	8,4327
0,005	32,90	0,00101	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,006	36,18	0,00101	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,007	39,02	0,00101	20,532	163,38	2572,5	2408,8	0,5591	8,2760
0,008	41,53	0,00101	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,009	43,79	0,00101	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875
0,01	45,83	0,00101	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,015	54,00	0,00101	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089
0,02	60,09	0,00102	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092

Продолжение таблицы 7

p	$t_{нас}$	v'	v''	h'	h''	Γ	s'	s''
МПа	°С	мЗ/кг	мЗ/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0,025	64,99	0,00102	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321
0,03	69,12	0,00102	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,04	75,89	0,00103	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,05	81,35	0,00103	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,06	85,95	0,00103	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,07	89,96	0,00104	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,08	93,51	0,00104	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,09	96,71	0,00104	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2696	7,3963
0,1	99,63	0,00104	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
0,15	111,37	0,00105	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
0,2	120,23	0,00106	0,8859	504,7	2202,2	2202,2	1,5301	7,1286
0,25	127,43	0,00107	0,7188	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
0,3	133,54	0,00107	0,6059	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
0,35	138,88	0,00108	0,5243	584,3	2632,5	2148,2	1,7273	6,6412
0,4	143,62	0,00108	0,4624	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
0,45	147,92	0,00109	0,4139	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570
0,5	151,85	0,00109	0,3748	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
0,6	158,84	0,00110	0,3156	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598

Продолжение таблицы 7

p	$t_{\text{нас}}$	v'	v''	h'	h''	Γ	s'	s''
МПа	°С	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
0,7	164,96	0,00111	0,2727	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
0,8	170,42	0,00112	0,2403	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
0,9	175,36	0,00112	0,2148	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
1,0	179,88	0,00113	0,1943	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
1,2	187,96	0,00114	0,1632	798,4	2783,4	1985,0	2,2160	6,5210
1,4	195,04	0,00115	0,1407	830,1	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
1,5	198,28	0,00115	0,13165	844,7,6	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418
1,6	201,37	0,00116	0,1237	858,6	2792,2	1933,6	2,3436	6,4187
1,8	207,10	0,00117	0,1103	884,6	2795,1	1910,5	2,3976	6,3759
2,0	212,37	0,00118	0,0995	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
2,5	223,94	0,00120	0,0799	962,0	2800,8	1838,8	2,5543	6,2536
3,0	233,84	0,00122	0,066	1008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
3,5	242,54	0,00124	0,0570	1049,8	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
4,0	250,33	0,00125	0,0497	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
4,5	257,41	0,00127	0,0440	1122,2	2796,5	1674,3	2,8614	6,0171
5	263,92	0,00129	0,0394	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
6	275,56	0,00132	0,0324	1213,9	2783,3	1569,4	3,0277	5,8878
7	285,80	0,00135	0,0273	1267,7	2771,4	1503,7	3,1225	5,8126
8	294,98	0,00138	0,0235	1317,5	2757,5	1440,0	3,2083	5,7430
9	303,31	0,00142	0,0205	1364,2	2741,8	1377,6	3,2875	5,6773

Продолжение таблицы 7

p	$t_{\text{нас}}$	v'	v''	h'	h''	γ	s'	s''
МПа	°С	м ³ /кг	м ³ /кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/кг	кДж/(кг·К)	кДж/(кг·К)
10	310,96	0,00145	0,0180	1408,6	2724,4	1315,8	3,3616	5,6143
11	318,04	0,00149	0,0149	1451,2	2705,4	1254,2	3,4316	5,5531
12	324,64	0,00153	0,0143	1492,6	2684,4	1192,2	3,4986	5,4930
13	330,81	0,00157	0,0128	1533,0	2662,4	1129,4	3,5633	5,4333
14	336,63	0,00161	0,0115	1572,8	2638,3	1065,5	3,6262	5,3737

