



УДК 563.7

Составители: Кувардина Е.М. Жмакин В.А.

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры  
теплогазоснабжения Н.С. Кобелев

**ТЕПЛОФИЗИКА:** методические указания и задания к самостоятельной работе для для магистрантов направления подготовки 08.04.01 «Строительство» очной и заочной форм обучения / Юго-зап. гос. ун-т; сост.: Е.М. Кувардина, В.А. Жмакин Курск, 2017. 35 с.; табл.15. Библиогр.: с. 23.

Содержат задания к самостоятельной работе по теплофизике, примеры решения задач, а также необходимый справочный материал в виде таблиц.

Методические указания предназначены для магистрантов направления подготовки 08.04.01 «Строительство» очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.  
Усл.печ.л. 2 Уч.изд.л. 1,84 Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.  
Юго-Западный государственный университет  
305040 Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

## Содержание

Общие методические рекомендации	4
Задача № 1 Уравнение состояния идеальных газов	6
Задача № 2 Смеси идеальных газов	7
Задача № 3 Водяной пар	8
Задача № 4 Передача тепла теплопроводностью	10
Задача № 5 Лучистый теплообмен. Экранирование	12
Задача № 6 Сложный теплообмен	14
Задача № 7 Массообменные процессы	17
Контрольные вопросы	20
Библиографический список	23
Приложение	
Таблица П.1 Физические свойства воздуха при давлении $p=1.013 \cdot 10^5$ Па	24
Таблица П.2 Физические свойства воды на линии насыщения	25
Таблица П.3 Физические свойства некоторых металлов	26
Таблица П.4 Степень черноты для различных материалов	27
Таблица П.5 Насыщенный водяной пар (по температурам)	28
Таблица П.6 Насыщенный водяной пар (по давлениям).	29
Таблица П.7 Вода и перегретый водяной пар	32

## Общие методические рекомендации

Усвоение курса «Теплофизика» невозможно без самостоятельного выполнения студентами индивидуальных заданий, решения задач.

В процессе обучения преподаватели используют активные формы работы со студентами: чтение лекций различных форм (лекция-монолог, лекция-диалог, мультимедийная лекция), промежуточный контроль, индивидуальные беседы, собеседование.

В ходе лекционных занятий обучающимся рекомендуется вести конспект лекций, записи в конспекте следует структурировать по тематическому содержанию, используя заголовки, подзаголовки, абзацы, красную строку, отступ, подчеркивание и т.п. знаки. Следует аккуратно оформлять графические материалы (схемы, графики и др.).

При записи формул рекомендуется записывать наименование (содержание) входящих в формулу величин. При записи эмпирической формулы необходимо указывать размерности входящих в формулу величин и размерность результатов подсчета по такой формуле.

На лекциях излагаются и разъясняются основные понятия темы, связанные с теоретическими и практическими проблемами, даются рекомендации для самостоятельной работы. В ходе лекции обучающийся должен внимательно слушать и конспектировать материал.

Изучение наиболее важных тем или разделов дисциплины сопровождается практическими занятиями, которые обеспечивают контроль подготовленности обучающихся, закрепления учебного материала, приобретение опыта устных публичных выступлений, ведения дискуссии, в том числе аргументацию и защиту выдвигаемых положений.

Практические занятия предполагают самостоятельную работу обучающихся, связанную с освоением материала, полученного на лекции, и материала, изложенного в учебниках и учебных пособиях.

Самостоятельную работу следует начинать с первых занятий. От занятия к занятию нужно регулярно прочитывать конспект лекций, знакомиться с соответствующими разделами учебников, читать и конспектировать литературу по каждой теме. Самостоятельная работа дает обучающимся возможность равномерно распределить нагрузку, способствует качественному усвоению учебного материала.

В случае необходимости обучающиеся обращаются за консультацией к преподавателю по вопросам дисциплины «Теплофизика».

Основная цель самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины - закрепить теоретические знания, полученные в процессе регулярных занятий.

Изучение литературы составляет значительную часть самостоятельной работы обучающегося, одним из приемов закрепления учебного материала; рекомендуется конспектирование, которое помогает научиться правильно, кратко и четко излагать своими словами прочитанный материал.

Методические указания предназначены для самостоятельного решения задач по дисциплине «Теплофизика», в них приведены задания и подробные пояснения к решению этих заданий. Также методические указания содержат перечень контрольных вопросов для самопроверки знаний полученных в результате освоения курса.

Выбор исходных данных для решения задач осуществляется из соответствующих таблиц по последней и предпоследней цифрам шифра. Шифр соответствует номеру зачётной книжки.

### ЗАДАЧА № 1 Уравнение состояния идеальных газов

Определить массовый расход газа (кг/с) при известном объемном расходе  $V, \text{м}^3/\text{мин}$ , температуре  $t^\circ\text{C}$  и манометрическом давлении  $P_m, \text{кПа}$ . Барометрическое давление составляет  $P=98100 \text{ Па}$ .

Таблица исходных данных к задаче 1.

Последняя цифра шифра	Газ	$V, \text{м}^3/\text{мин}$	Предпоследняя цифра шифра	$t, ^\circ\text{C}$	$P_m, \text{кПа}$
1	2	3	4	5	6
0	CO	0,4	0	80	40
1	CO <sub>2</sub>	0,5	1	65	42
2	N <sub>2</sub>	0,6	2	70	50
3	Воздух	0,1	3	75	70
4	O <sub>2</sub>	0,5	4	85	45
5	CO <sub>2</sub>	0,4	5	80	50
6	CH <sub>4</sub>	0,2	6	70	60
7	Воздух	0,3	7	75	72
8	O <sub>2</sub>	0,4	8	65	80
9	N <sub>2</sub>	0,2	9	85	55

Исходные данные:  $V=$  ,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;  $t=$  ,  $^\circ\text{C}$ ;  $P_m=$  ,  $\text{кПа}$ ; газ –

#### Решение

1. Перевод единицы измерения объемного расхода из  $\text{м}^3/\text{мин}$  в  $\text{м}^3/\text{с}$

$$V = V/60, \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. Абсолютное давление  $P = P + 1000 \cdot P_m, \text{ Па}$ .

3. Массовый расход газа (из уравнения состояния  $P \cdot V = G \cdot R \cdot T$ )

$$G = P \cdot V / (R \cdot T), \text{ кг/с},$$

где  $R = 8314/\mu$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);  $\mu$  – молекулярная масса газа, кг/кмоль (см. Прилож., табл. П.1);  $T = t + 273$  – абсолютная температура газа, К;  $P$  – абсолютное давление газа, Па;  $V, \text{ м}^3/\text{с}$  – объемный расход газа.

## ЗАДАЧА № 2 Смеси идеальных газов

Смесь газов, для которой известен объемный состав: находится при давлении  $P_{см.}$  и температуре  $t_{см.}$ . Определить молекулярную массу смеси и её газовую постоянную, плотность и удельный объем смеси при заданных условиях и при нормальных условиях, а также парциальные давления компонентов смеси.

Таблица исходных данных к задаче 2

Последняя цифра шифра	$P_{см.}$ , мм рт.ст.	$t_{см.}$ , °C	Предпоследняя цифра шифра	Объемный состав смеси, %			
				$N_2$	$O_2$	$CO_2$	$H_2O$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	748	150	0	40	20	30	10
1	750	250	1	50	25	13	12
2	760	350	2	60	30	2	8
3	740	450	3	70	25	1	4
4	752	150	4	80	10	5	5
5	758	250	5	85	11	3	1
6	760	150	6	75	17	4	4
7	768	100	7	65	23	4	8
8	770	100	8	55	27	8	10
9	768	200	9	45	22	18	15

Исходные данные:  $r_{N_2} = \%$ ;  $r_{O_2} = \%$ ;  $r_{CO_2} = \%$ ;  $r_{H_2O} = \%$ ;  
 $t_{см.} = \text{°C}$ ;  $P_{см.} = \text{мм рт.ст.}$  .

### Решение

1. Перевод единицы измерения давления из мм рт. ст. в паскали  
 $P_{см.} = P_{см.рт.ст.} \cdot 133.3, \text{ Па}$ ;
2. Кажущаяся молекулярная масса смеси  
 $\mu_{см.} = (\mu_{N_2} \cdot r_{N_2} + \mu_{O_2} \cdot r_{O_2} + \mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2} + \mu_{H_2O} \cdot r_{H_2O})$ , кг/кмоль,  
 где  $\mu_{N_2} = 28$ ,  $\mu_{O_2} = 32$ ,  $\mu_{CO_2} = 44$ ,  $\mu_{H_2O} = 18$  – молекулярные массы азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара, кг/кмоль;  $r_{N_2}$ ,  $r_{O_2}$ ,  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$  – объемные доли компонентов смеси (в долях единицы).
3. Газовая постоянная смеси  $R_{см.} = 8314 / \mu_{см.}$ , Дж/(кг·К).

4. Удельный объём смеси (из уравнения состояния  $P_{см} \cdot v_{см} = R_{см} T_{см}$ ) и плотность смеси при заданных условиях  $v_{см} = R_{см} \cdot T_{см} / P_{см}$ , м<sup>3</sup>/кг и  $\rho_{см} = 1/v_{см}$ , кг/м<sup>3</sup>, где  $P_{см}$  – давление смеси, Па, (см.п.1);  $T_{см} = t_{см} + 273$ , К – абсолютная температура смеси.

5. Удельный объём смеси и плотность смеси при нормальных условиях  $v_{см.0} = R_{см} \cdot T_{см.0} / P_{см.0}$ , м<sup>3</sup>/кг; и  $\rho_{см.0} = 1/v_{см.0}$ , кг/м<sup>3</sup>, где  $P_{см.0} = 1,013 \cdot 10^5$ , Па и  $T_{см.0} = 273$ , К – соответственно, давление смеси и ее абсолютная температура при нормальных условиях.

6. Парциальные давления компонентов смеси

$$P_{N_2} = P_{см} \cdot r_{N_2}, \text{ Па}; \quad P_{O_2} = P_{см} \cdot r_{O_2}, \text{ Па}; \quad P_{CO_2} = P_{см} \cdot r_{CO_2}, \text{ Па};$$

$$P_{H_2O} = P_{см} \cdot r_{H_2O}, \text{ Па},$$

где  $r_{N_2}$ ,  $r_{O_2}$ ,  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$  – объёмные доли компонентов смеси (**в долях единицы**).

### ЗАДАЧА № 3 Водяной пар. Таблицы и диаграммы водяного пара

Определить состояние водяного пара и дать его краткую характеристику (вид пара и его исходные параметры см. таблицу заданий). Указать заданное состояние пара в диаграмме h-s.

Параметры пара определить с помощью таблиц воды и водяного пара и диаграммы h-s для пара. Полученные данные сравнить.

Таблица исходных данных к задаче 3

Последняя цифра шифра	Заданное состояние	Состояние рабочего тела задано параметрами		
		P, бар	t, °C	x
1	2	3	4	5
0	Перегретый пар	5	200	-
1	Влажный пар	10	-	0,9
2	Сухой насыщенный пар	-	200	-
3	Сухой насыщенный пар	15	-	-
4	Перегретый пар	10	250	-



## Продолжение таблицы исходных данных к задаче 3

1	2	3	4	5
5	Влажный пар	5	-	0,8
6	Влажный пар	15		0,85
7	Перегретый пар	15	250	-
8	Сухой насыщенный пар	10	-	-
9	Перегретый пар	20	300	-

Исходные данные: ...состояние пара,  $P = \dots$ , бар;  $t = \dots$ , °C ;  $x = \dots$

## Решение

**Состояние влажного пара** — в  $h-s$  диаграмме (рис. 3.1) находим изобару  $P_1$  и на пересечении ее с линией сухости  $x_1$  определяем точку, соответствующую состоянию влажного пара – точку 1.

Точка 4 – тоже **состояние влажного пара**, определяется аналогично, давлением  $P_2$  и линией сухости  $x_4$ .

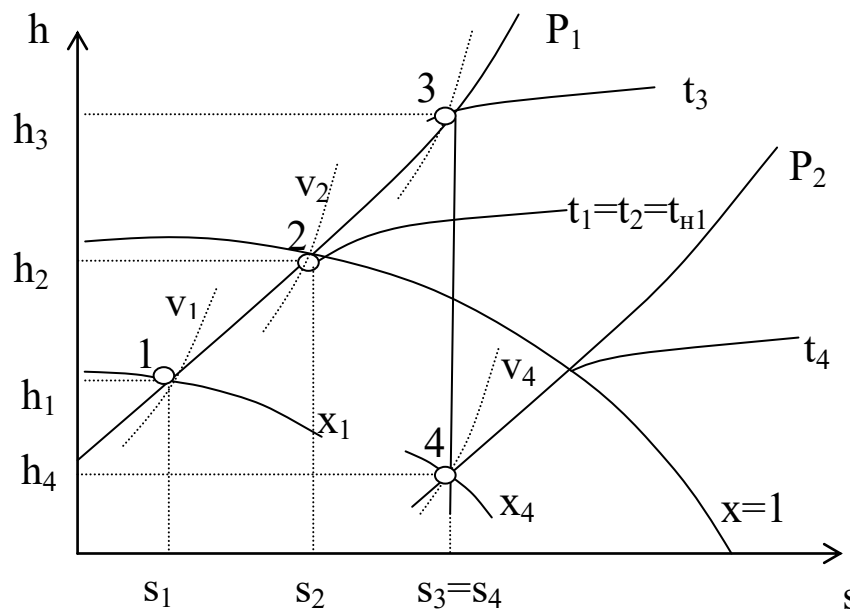


Рис.3.1. Состояния влажного (т.т. 1 и 4), сухого насыщенного (т. 2) и перегретого паров (т. 3)

**Состояние сухого насыщенного пара** можно задать двумя способами:

1) если пар задан **давлением**, то его состояние находится путём пересечения изобары  $P_1$  с верхней пограничной кривой ( $x=1$ ) – точка 2. Процесс 1-2 – процесс подсушки пара. В данном процессе пар в

пароперегревателе из влажного насыщенного переходит в сухой насыщенный.

2) если пар задан **температурой**, то его состояние находится путём пересечения изотермы  $t_1$  с верхней пограничной кривой ( $x=1$ ) – точка 2. Температуры в т.т. 1 и 2 одинаковые и равняются температуре насыщения при давлении  $P_1$ , т.е  $t_1=t_2=t_{н1}$ .

**Состояние перегретого пара** находится путём пересечения изобары  $P_1$  с изотермой  $t_3$ .- точка 3. Процесс 2-3 – процесс перегрева пара относительно температуры насыщения  $t_{н1}$ , осуществляется также в пароперегревателе.

Процесс 3-4 — адиабатное расширение пара от давления  $P_1$  до давления  $P_2$ . Адиабатный процесс изображается вертикальной линией ( $s=Const$ ). Температура в т.4 определяется изотермой, проходящей через эту точку.

Через точки 1,2,3,4 проводим основные линии: линии объема  $v_1, v_2, v_3, v_4$ ; линии энтальпии  $h_1, h_2, h_3, h_4$  и линии энтропии  $s_1, s_2, s_3, s_4$ . По  $h-s$  диаграмме снимаем показания всех перечисленных параметров.

**Параметры состояний пара в т.т. 1, 2, 3 и 4** можно определить и по таблицам воды и водяного пара, (см. таблицы П 5, П 6. П 7).

#### **Задача № 4. Передача тепла теплопроводностью**

Обмуровка печи состоит из слоёв шамотного,  $\delta_1$ , [ $\lambda=1,14$  Вт/(м·К)] и красного,  $\delta_3$ , [ $\lambda=0,76$  Вт/(м·К)] кирпича, между которыми расположена засыпка из изоляционного материала,  $\delta_2 = 250$ мм, (рис.4.1).

Определить тепловые потери через  $1 \text{ м}^2$  поверхности стенки, если на внутренней стороне шамотного кирпича температура равна  $t_{w1}$ , а на наружной стороне красного кирпича  $t_{w2}$ . Какой толщины требуется слой из красного кирпича, если отказаться от применения засыпки из изоляционного материала при тех же температурных условиях и неизменном тепловом потоке?

Таблица исходных данных к задаче 4

Последн. цифра шифра	$\delta_1$ , мм	$t_{w1}$ , °С	Пред-посл цифра шифра	$\delta_3$ , мм	$t_{w2}$ , °С	Изоляционный материал	
						Название	$\lambda_2 = \dots$ , Вт/(м·К)
0	80	1050	0	60	90	Совелит	$0,0901 + 0,00008 \cdot t$
1	90	980	1	60	85	Новоасбозурит	$0,144 + 0,00014 \cdot t$
2	80	1070	2	120	93	Диатомит молот.	$0,091 + 0,00028 \cdot t$
3	100	950	3	60	97	Вермикулит	$0,072 + 0,000362 \cdot t$
4	120	1030	4	125	86	Асбослюда	$0,120 + 0,000148 \cdot t$
5	120	945	5	125	82	Асботермит	$0,109 + 0,000145 \cdot t$
6	80	1020	6	125	94	Асбозонолит	$0,143 + 0,00019 \cdot t$
7	90	990	7	60	78	Асбозурит	$0,1622 + 0,000169 \cdot t$
8	80	1140	8	120	89	Диатомит молот.	$0,091 + 0,00028 \cdot t$
9	120	1135	9	60	91	Шлаковая вата	$0,05 + 0,000145 \cdot t$

Примечание: 1 Расчетное значение толщины красного кирпича округлить (в сторону увеличения) до величины, кратной 60 мм.

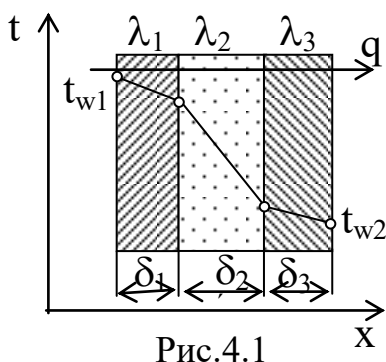


Рис.4.1

### Решение

1) Находим тепловой поток через 3-х слойную плоскую стенку по формуле

$$q = (t_{w1} - t_{w2}) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3), \text{ Вт/м}^2,$$

где  $t_{w1}$ ,  $t_{w2}$  – температуры поверхностей стенки, °С;

$\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  – толщины слоев, м;

$(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3)$  – сумма термических сопротивлений слоев стенки,  $\text{м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$ .

Предварительно определяем коэффициент теплопроводности заданного материала засыпки (см. табл. исходных данных) по формуле  $\lambda_2, \text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ , (формула приводится в таблице), где  $t = 0,5(t_{w1} + t_{w2})$  – средняя температура слоя засыпки (приблизительно).

2) Если отказаться от слоя засыпки, то стенка станет 2-х слойной (см. рис 4.2). Обозначения на рисунке оставляем теми же.

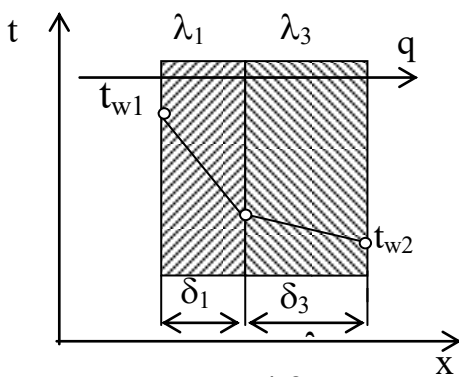


Рис. 4.2

Тепловой поток через 2-х слойную стенку:

$$q = (t_{w1} - t_{w2}) / (\delta_1/\lambda_1 + \delta_3'/\lambda_3), \text{Вт} / \text{м}^2.$$

Т.к.  $q$  и  $(t_{w1} - t_{w2})$  по условию задачи остались такими же, то термические сопротивления 3-х слойной и 2-х слойной стенок должны быть одинаковые, т.е.

$$(\delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3) = (\delta_1/\lambda_1 + \delta_3'/\lambda_3),$$

отсюда

$$\delta_3' = \lambda_3(\delta_2/\lambda_2 + \delta_3/\lambda_3), \text{мм}.$$

Округляем эту величину до значения кратного 60.

### Задача № 5. Лучистый теплообмен. Экранирование

Сравнить лучистые тепловые потоки между двумя плоскими параллельными поверхностями, разделенными прозрачной средой, (воздух), для двух случаев: 1) между поверхностями НЕТ экрана,  $q$ ; 2) между поверхностями расположен ОДИН экран,  $q^3$ .

Температуры поверхностей:  $t_{w1}$  и  $t_{w2} \text{ } ^\circ\text{C}$ , степени черноты поверхностей:  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , экрана –  $\varepsilon_3$  (см. табл. П.4).

Таблица исходных данных к задаче 5

Последняя цифра шифра	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	Материал экрана	Предпоследняя цифра шифра	$t_{w1},$ °С	$t_{w2},$ °С
1	2	3	4	5	6	7
0	0,5	0,6	Алюминий полиров	0	200	30
1	0,55	0,52	Латунь полированная	1	250	35
2	0,60	0,70	Хром полированный	2	300	25
3	0,52	0,72	Алюминий шероховат.	3	350	20
4	0,58	0,74	Латунь прокатная	4	400	40
5	0,58	0,74	Хром полированный	4	400	40
6	0,70	0,58	Медь полированная	6	500	50
7	0,65	0,62	Алюминий шероховат	7	550	55
8	0,75	0,73	Латунь полированная	8	600	60
9	0,80	0,77	Сталь полированная	9	650	65

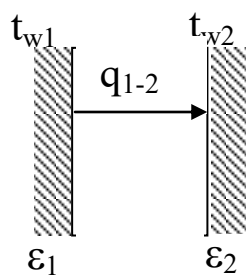


Рис.5.1

### Решение

1) Между поверхностями НЕТ экрана, рис.5.1 Определяем удельный тепловой поток между плоскими поверхностями по формуле:

$$q_{1-2} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_{w1}/100)^4 - (T_{w2}/100)^4], \text{ Вт/м}^2,$$

где  $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная

степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене.

Для 2-х параллельно расположенных поверхностей приведенная степень черноты определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$$

Подставляем полученное значение  $\varepsilon_{\text{пр}}$  в формулу теплового потока.

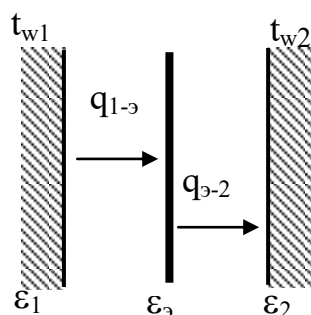


Рис.5.2

2) Между поверхностями расположен ОДИН экран, (рис.5.2)

При установившихся условиях

$$q_{1-3} = q_{3-2} = q_{1-3-2} = q_{1-2}^{\text{э}},$$

где  $q_{1-2}^{\text{э}}$  – тепловой поток между 1-ой и 2-ой поверхностями при наличии экрана.

Тепловой поток при наличии экрана

$$q_{1-2}^{\text{э}} = \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}} C_0 [(T_{w1}/100)^4 - (T_{w2}/100)^4], \text{ Вт/м}^2,$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}}$  – приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене, при наличии между ними экрана (одного или нескольких).

Если число плоских экранов  $n$ , приведенную степень черноты  $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}}$  считают по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 + 2 \cdot \sum 1/\varepsilon_i^{\text{э}} - (n+1)).$$

В данной задаче ОДИН экран, т.е.  $n=1$ . Степень черноты экрана  $\varepsilon^{\text{э}}$  выбираем по табл. П 4 (см. приложение)

**Вывод:** без экрана между поверхностями тепловой поток составляет  $q_{1-2} = \dots$  Вт/м<sup>2</sup>; при наличии одного экрана между поверхностями тепловой поток составляет  $q_{1-2}^{\text{э}} = \dots$  Вт/м<sup>2</sup>, т.е. тепловой поток при установке экрана уменьшился в  $q_{1-2}/q_{1-2}^{\text{э}} = \dots$  раз.

## Задача № 6 Сложный теплообмен

Определить потери теплоты конвекцией и излучением (отдельно) за сутки горизонтально расположенного трубопровода диаметром  $d$  мм и длиной  $l$  м, охлаждаемого свободным потоком воздуха, если температура поверхности трубопровода  $t_w$ , температура воздуха в помещении  $t_f$  (степень черноты трубы  $\varepsilon$  см. табл. П.4 приложения). Данные, необходимые для решения задачи, взять из таблицы исходных данных.

Таблица исходных данных к задаче 6

Посл. цифра шифра	d, мм	ℓ, м	Пред-посл. цифра шифра	t <sub>w</sub> , °С	t <sub>f</sub> , °С	Поверхность трубы
1	2	3	4	5	6	7
0	230	3	0	150	15	Жесть белая старая
1	220	5	1	140	20	Асбестовый картон
2	250	7	2	130	25	Лак белый
3	240	9	3	120	35	Лак черный матовый
4	210	11	4	110	25	Железо оцинкованное
5	270	6	5	100	20	Масляная краска
6	340	4	6	190	15	Сталь шероховатая
7	320	12	7	18-	10	Алюминиевая краска
8	360	8	8	170	5	Сталь окисленная
9	300	10	9	160	0	Чугун шероховатый

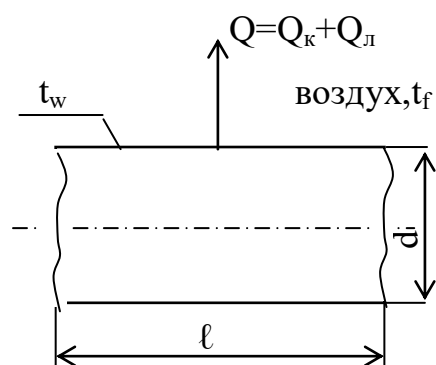


Рис.6

### Решение

Общие тепловые потери  $Q$  трубы, рис. 8, составляют

$$Q = Q_k + Q_l, \text{ Вт,}$$

где  $Q_k$  - тепловые потери за счет конвекции;  $Q_l$  - тепловые потери за счет излучения.

Решение задачи состоит из двух частей.

**А) Тепловые потери за счет свободного движения воздуха у горячей трубы**

Конвективная составляющая общих тепловых потерь  $Q_k$  определяется по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F, \text{ Вт},$$

где  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F = \pi d l$  – поверхность трубы, м<sup>2</sup>.

Коэффициент теплоотдачи для горизонтальной трубы определяется по критериальному уравнению:

$$Nu_f = 0,5 \cdot (Pr \cdot Gr)_f^{0,25} \cdot (Pr_f / Pr_w)^{0,25},$$

где  $Nu_f = \alpha \cdot d / \lambda_f$  - критерий Нуссельта.

Определяющей температурой в критериальном уравнении является температура окружающей среды  $t_f$ ; определяющим размером – наружный диаметр трубы  $d$ , м.

1) Свойства воздуха при температуре  $t_f$ , °С выбираем по таблице теплофизических свойств воздуха, табл. П.1. (см. приложение)

$\lambda = \dots$  Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности воздуха;

$\nu = \dots$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$Pr_f = \dots$  – критерий Прандтля для воздуха.

2) Считаем критерий Грасгофа по формуле:

$$Gr = g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot \Delta t / \nu^2,$$

где  $\beta = 1 / (273 + t_f)$ , 1/К – коэффициент объемного расширения воздуха;

$\Delta t = (t_w - t_f)$  - температурный напор, °С;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение силы тяжести.

3) Отношение  $Pr_f / Pr_w$  для газов равняется 1, т.е.  $Pr_f / Pr_w = 1$ .

4) Решаем критериальное уравнение

$$Nu_f = 0,5 \cdot (Pr \cdot Gr)_f^{0,25}$$

5) Находим коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu_f \cdot \lambda_f / d, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

6) Определяем тепловые потери за счет свободного движения воздуха

$$Q_k = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F = \dots \text{ Вт}$$

Это потери тепла в секунду (Вт = Дж/с).

За сутки потери тепла составят  $Q_k^{\text{сут}} = Q_k \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3}$ , кДж.

**Б) Тепловые потери за счет излучения** определяем по формуле:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 [(T_w / 100)^4 - (T_f / 100)^4] \cdot F, \text{ Вт},$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты.



При условии, что поверхность трубы много меньше поверхности стен в цехе  $\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_w$ .

По таблице П.4 выбираем для заданной поверхности (см. таблицу исходных данных)  $\varepsilon_w$ .

Подставляем исходные данные в формулу  $Q_{\text{л}}$

**За сутки** потери тепла составят  $Q_{\text{л}}^{\text{сут}} = Q_{\text{л}} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3}$ , кДж.

## Задача 7. Процессы массообмена

Вычислить коэффициент массоотдачи в процессе сушки песка в воздушной конвективной сушилке. Сушильный агент - воздух с параметрами по психрометру  $t_c, ^\circ\text{C}$  и  $t_m, ^\circ\text{C}$  перемещается вдоль поверхности испарения со скоростью  $w$ , м/с. Давление воздуха в сушилке  $P$ , мм рт.ст., длина поверхности испарения  $\ell$ , м.

Примечание: При решении задачи принять:

1) коэффициент диффузии  $D_0 = 21,6 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при нормальных физических условиях;

2) критериальное уравнение для процесса сушки  $Nu_D = C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135}$ .

Данные для решения задачи взять из табл.7.1 и 7.2

Таблица 7.1

Последняя цифра шифра	Показание психрометра		P, мм рт.ст.	Предпоследняя цифра шифра	w, м/с	ℓ, м
	$t_c, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$				
1	2	3	4	5	6	7
0	30	15	735	0	1,20	0,90
1	35	20	740	1	1,30	0,80
2	40	25	775	2	1,40	0,70
3	34	20	750	3	1,50	0,75
4	36	22	760	4	1,60	0,65
5	32	18	765	5	1,70	0,60
6	42	22	780	6	1,25	0,85
7	45	25	785	7	1,35	0,85
8	38	24	735	8	1,45	0,75

Продолжение таблицы 7.1.

1	2	3	4	5	6	7
9	40	22	785	9	1,55	0,70

Таблица 7.2. Значения коэффициентов С и n в критериальном уравнении для сушки материалов

Коэффициенты	Критерий Рейнольдса, Re		
	1÷20	200÷600	600÷70000
C	0,9	0,87	0,35
N	0,5	0,54	0,65

### Решение

Коэффициент массоотдачи  $\beta$  определяем по критериальному уравнению для сушки материалов

$$Nu_D = C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135},$$

где  $Nu_D = \beta \cdot \ell / D$  - диффузионный критерий Нуссельта;

$Re = \omega \cdot \ell / \nu$  - критерий Рейнольдса;

$Pr_D = \nu / D$  - диффузионный критерий Прандтля;

$Gu = (T_c - T_m) / T_c$  - критерий Гухмана.

Определяющим размером в данном уравнении является длина поверхности испарения  $\ell$ , определяющей температурой – температура воздуха  $t_c$ .

1) По температуре воздуха  $t_c = 32^\circ\text{C}$  по таблице Приложения 1 выбираем коэффициент кинематической вязкости воздуха  $\nu = 16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

2) Вычисляем критерий Рейнольдса

$$Re = \omega \cdot \ell / \nu = 1,8 \cdot 0,6 / 16 \cdot 10^{-6} = 67500.$$

По табл.10 выбираем коэффициенты  $C = 0,35$ ;  $n = 0,65$ , которые соответствуют значению критерия Re.

3) Приводим значение коэффициента диффузии  $D_o$ , заданного при нормальных условиях, к условиям сушки

$$D = (D_o \cdot P_o / P) \cdot [(273 + t_c) / 273]^{1+n},$$

где  $P_o$  - давление при нормальных условиях ( $P_o = 760 \text{ мм рт.ст.}$ );

$n$ -показатель степени, который зависит от состава газовой смеси над материалом. Для смеси водяного пара и воздуха  $n=0,8$ .

$$D=(D_0 \cdot P_0/P) \cdot [(273+t_c)/273]^{1+n} = \\ = (21,6 \cdot 10^{-6} \cdot 760/780) \cdot [(273+32)/273]^{1+0,8} = 0,26 \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

4) Диффузионный критерий Прандтля

$$Pr_D = \nu/D = 16 \cdot 10^{-6}/0,26 \cdot 10^{-4} = 0,615.$$

5) Критерий Гухмана

$$Gu = (T_c - T_m)/T_c = [(273+32) - (273+18)]/(273+32) = 0,0459.$$

6) Критерий Нуссельта

$$Nu_D = C \cdot Re^n \cdot Pr_D^{0,33} \cdot Gu^{0,135} = 0,35 \cdot 67500^{0,65} \cdot 0,615^{0,33} \cdot 0,0459^{0,135} = 271.$$

7) Коэффициент массоотдачи

$$\beta = Nu_D \cdot D/\ell = 271 \cdot 0,26 \cdot 10^{-4}/0,6 = 0,0117 \text{ м/с}.$$

Ответ: коэффициент массоотдачи  $\beta=0,0117 \text{ м/с}$ .

## Контрольные вопросы

1. Основные понятия и определения термодинамики: параметры состояния, рабочее тело и т.д. Какие параметры приняты в термодинамике за основные?
2. Уравнение состояния идеального газа. Индивидуальная и универсальная газовые постоянные.
3. Что такое массовый и объемный составы смеси идеальных газов и как можно перейти от одного состава к другому?
4. Первый и второй законы термодинамики. Анализ.
5. Основные термодинамические процессы идеальных газов. Их изображение в координатах  $P-v$  и  $T-s$ , анализ.
6. Циклы. Определение. Типы циклов, краткая характеристика.
7. Водяной пар. Определение. Виды паров, краткая характеристика каждого из паров? Области расположения этих паров в системе координат  $h-s$ .
8. Какой воздух называется влажным? Насыщенный и ненасыщенный воздух. Характеристики влажного воздуха.
9. Основные характеристики влажного воздуха? Как определить эти величины с помощью  $h-d$  диаграммы влажного воздуха, Приведите пример.
10. Какими параметрами можно задать состояние воздуха в  $h-d$  диаграмме влажного воздуха? Покажите на примере.
11. Что такое температура точки росы? Как определить ее с помощью  $h-d$  диаграммы влажного воздуха? Приведите пример.
12. Основные понятия тепло- и массообмена. Краткая характеристика 3-х механизмов переноса тепла: теплопроводностью, конвекцией и излучением
13. Температурное поле; одно-, двух- и трехмерные температурные поля; стационарное и нестационарные температурные поля.
14. Передача тепла теплопроводностью. Закон Фурье, коэффициент теплопроводности, его физический смысл, размерность.
15. Передача тепла теплопроводностью через плоскую однослойную и многослойную стенку, термические сопротивления, схема изменения температур по слоям.

16. Передача тепла теплопроводностью через цилиндрическую однослойную стенку, термическое сопротивление, схема изменения температуры в слое.

17. Передача тепла теплопроводностью через цилиндрическую многослойную стенку, термическое сопротивление, схема изменения температур по слоям.

18. Теплообмен излучением. Основные понятия лучистого теплообмена: лучистый тепловой поток, излучательная способность тела. Понятия абсолютно черного, абсолютно белого, абсолютно прозрачного и серого тел.

19. Законы лучистого теплообмена: закон Стефана-Больцмана,

20. Кирхгофа, Ламберта.

21. Теплообмен излучением между двумя плоскими параллельными поверхностями.

22. Теплообмен излучением между телами, когда одно тело находится внутри другого.

23. Использование экранов для защиты от излучения.

24. Конвективный теплообмен. Основное уравнение конвективного теплообмена (уравнение Ньютона-Рихмана). Коэффициент теплоотдачи, его физический смысл, размерность.

25. Критерии теплового подобия. Критериальные уравнения конвективного теплообмена.

26. Теплоотдача при свободной конвекции в неограниченном пространстве. Режимы свободной конвекции. Критериальное уравнение. Факторы, влияющие на интенсивность теплообмена.

27. Теплоотдача при вынужденном движении теплоносителя внутри трубы. Режимы движения. Критериальные уравнения.

28. Сложный теплообмен.

29. Теплопередача. Физическая сущность процесса. Уравнение теплопередачи, коэффициент теплопередачи.

30. Теплопередача через плоскую однослойную стенку. Уравнение теплопередачи, коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление теплопередачи. Схема распределения температур.

31. Теплопередача через плоскую многослойную стенку. Уравнение теплопередачи, коэффициент теплопередачи, термическое сопротивление теплопередачи. Схема распределения температур.

32. Расчетные уравнения процесса теплопередачи: уравнение теплового баланса и уравнение теплопередачи.

### Библиографический список

1. Теплотехника [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
2. Лифенцева, Л.В. Теплотехника [Электронный ресурс] : учебное пособие / Л.В. Лифенцева ; под ред. Н.В. Шишкиной. - 2-е, перераб. и доп. - Кемерово : Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2010. - 188 с. // Режим доступа – <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=141513>
3. Оболенский, Н.В. Практикум по теплотехнике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н.В. Оболенский, В.Л. Осокин ; Министерство образования Нижегородской области, Нижегородский государственный инженерно-экономический институт. - Княгино : НГИЭИ, 2010. - 236 с. // Режим доступа – <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=430983>
4. Теплотехника [Текст] : учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М. : Высшая школа, 2003. - 671 с.
5. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М. : Академия, 2008. - 272 с.
6. Ерофеев В. Л. Теплотехника [Текст] : учебник / В. Л. Ерофеев. - М. : Академкнига, 2006. - 456 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1 Физические свойства сухого воздуха при давлении  
 $P=1,013 \cdot 10^5$  Па

t, °C	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	Pr
1	2	3	4	5	6
-50	1,584	1,013	0,0204	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	0,0212	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	0,0220	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	0,0228	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	0,0236	12,43	0,712
0	1,293	1,005	0,0244	13,28	0,707
10	1,247	1,005	0,0251	14,16	0,705
20	1,205	1,005	0,0259	15,06	0,703
30	1,165	1,005	0,0267	16,00	0,701
40	1,128	1,005	0,0276	16,96	0,699
50	1,093	1,005	0,0283	17,95	0,698
60	1,060	1,005	0,0290	18,97	0,696
70	1,029	1,009	0,0296	20,02	0,694
80	1,000	1,009	0,0305	21,09	0,692
90	0,972	1,009	0,0313	22,10	0,690
100	0,946	1,009	0,0321	23,13	0,688
120	0,898	1,009	0,0334	25,45	0,686
140	0,854	0,013	0,0349	27,80	0,684
160	0,815	1,017	0,0364	30,09	0,682
180	0,779	1,022	0,0378	32,49	0,681
200	0,746	1,026	0,0393	34,85	0,680
250	0,674	1,038	0,0427	40,61	0,677
300	0,615	1,047	0,0460	48,33	0,674
350	0,566	1,059	0,0491	55,46	0,678
400	0,524	1,068	0,0521	63,09	0,678
500	0,456	1,093	0,0574	79,38	0,687
600	0,404	1,114	0,0622	96,89	0,699
700	0,362	1,135	0,0671	115,4	0,706



Продолжение таблицы П.1

1	2	3	4	5	6
800	0,329	1,156	0,0718	134,8	0,713
900	0,301	1,172	0,0763	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	0,0807	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	0,0850	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	0,0915	233,7	0,724

Таблица П.2. Физические свойства воды на линии насыщения

t, °C	$P \cdot 10^{-5}$ , Па	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$C_p$ , кДж/(кг·К)	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4$ , К <sup>-1</sup>	Pr
1	2	3	4	5	6	7	8
0	1,013	999,9	4,212	0,55	1,789	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	0,57	1,306	0,70	9,52
20	1,013	998,2	4,183	0,60	1,006	1,82	7,02
30	1,013	995,7	4,174	0,62	0,805	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	0,64	0,659	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	0,65	0,556	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	0,66	0,478	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	0,67	0,415	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	0,67	0,365	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	0,68	0,326	6,95	1,95
100	1,013	958,4	4,220	0,68	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,69	0,272	8,08	1,60
120	1,98	943,1	4,250	0,69	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,266	0,69	0,233	9,19	1,36
140	3,61	926,1	4,287	0,69	0,217	9,72	1,16
150	4,76	917,0	4,313	0,68	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,68	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,3	4,380	0,68	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,67	0,173	11,9	1,00
190	12,55	876,0	4,459	0,67	0,165	12,6	0,96
200	15,55	863,0	4,505	0,66	0,158	13,3	0,9
210	19,08	852,8	4,555	0,66	0,153	14,1	0,9
220	23,20	840,3	4,614	0,65	0,148	14,8	0,89

Продолжение таблицы П.2

1	2	3	4	5	6	7	8
230	27,98	827,3	4,681	0,64	0,145	15,9	0,88
240	33,48	813,6	4,756	0,63	0,141	16,8	0,87
250	39,78	799,0	4,844	0,62	0,137	18,1	0,86
260	46,94	784,0	4,949	0,61	0,135	19,7	0,87
270	55,05	767,9	5,070	0,59	0,133	21,6	0,88
280	64,19	750,7	5,230	0,57	0,131	23,7	0,90
290	74,45	732,3	5,485	0,56	0,129	26,2	0,93
300	85,92	712,5	5,736	0,54	0,128	29,2	0,97
320	112,90	667,1	6,574	0,51	0,128	38,2	1,11
340	146,08	610,1	8,165	0,46	0,127	53,4	1,39
350	165,37	574,4	9,504	0,43	0,126	66,8	1,60
360	186,74	528,0	13,984	0,40	0,126	109	2,3
370	210,53	450,5	40,321	0,34	0,126	264	6,79

Таблица П.3. Физические свойства некоторых металлов

Наименование материала	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$t$ , °С	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , кДж/(кг·К)
1	2	3		4
Алюминий	2700	0	209	0,896
Бронза	8800	20÷200	48,2	0,368
Латунь	8500	20÷200	109	0,392
Медь	8930	0	390	0,388
Нержав. сталь 1Х18Н10Т	7860	20÷200	16,3	0,494
Серебро	10500	0	419	0,234
Сталь 20	7830	20÷200	51,0	0,494
Сталь 45	7830	20÷200	47,8	0,490
Титан	4540	0	15,1	0,531

Таблица П.4. Степень черноты для различных материалов

Наименование материала	t, °С	$\varepsilon$
1	2	3
Алюминиевая краска	-	0,50
Алюминий полированный	50÷500	0,04÷0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20÷50	0,06÷0,07
Асбестовый картон	20	0,96
Жесть белая старая	20	0,28
Железо оцинкованное	30	0,23
Кирпич красный шероховатый	20	0,88÷0,93
Лак черный матовый	40÷100	0,96÷0,98
Лак белый	40÷100	0,80÷0,95
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатная	20	0,06
Масляная краска	-	0,94
Медь окисленная	500	0,88
Медь полированная	50÷1000	0,02
Снег	-	0,96
Сталь окисленная	-	0,80
Сталь полированная	-	0,54
Сталь с шероховатой поверхностью	50	0,56
Стекло	250÷1000	0,87÷0,72
Хром полированный	-	0,17
Чугун шероховатый	-	0,96
Эмаль белая	20	0,90

Таблица П.5. Насыщенный водяной пар (по температурам)

Таблица приводится с сокращением

t, °C	p, бар	Уд. объем		Энтальпия		r	Энтропия	
		$v' \cdot 10^6$	$v''$	$h'$	$h''$		$s'$	$s''$
0,01	0,0061	1000,2	206,3	0	2501	2501	0	9,16
5	0,0087	1000,0	147,2	21,01	2510	2489	0,08	9,03
10	0,0123	1000,3	106,4	41,99	2519	2477	0,15	8,90
15	0,1704	1000,8	77,97	62,94	2528	2466	0,22	8,78
20	0,0241	1001,7	57,84	83,86	2538	2454	0,29	8,67
25	0,0307	1002,9	43,40	104,8	2547	2442	0,37	8,56
30	0,0424	1004,3	32,93	125,7	2556	2430	0,44	8,44
35	0,0547	1006,0	25,24	146,6	2565	2418	0,50	8,35
40	0,0737	1007,8	19,55	167,5	2574	2406	0,57	8,26
45	0,0958	1009,9	15,28	188,4	2583	2394	0,64	8,17
50	0,1234	1012,1	12,04	200,3	2592	2383	0,70	8,08
55	0,1574	1014,5	9,578	230,2	2601	2371	0,77	7,99
60	0,1992	1017,1	7,678	251,1	2609	2358	0,83	7,91
65	0,2501	1019,9	6,201	272,0	2618	2346	0,89	7,83
70	0,3116	1022,8	5,045	292,9	2627	2334	0,95	7,76
75	0,3855	1025,9	4,133	313,9	2635	2321	1,02	7,68
80	0,4736	1029,2	3,408	334,9	2644	2309	1,08	7,61
85	0,5780	1032,6	2,828	355,9	2652	2296	1,13	7,55
90	0,7011	1036,1	2,361	376,9	2660	2283	1,19	7,48
100	1,0133	1043,7	1,673	419,1	2676	2257	1,31	7,36
110	1,4326	1051,9	1,210	461,3	2692	2231	1,42	7,24
120	1,9854	1060,6	0,891	503,7	2706	2203	1,53	7,13
130	2,7012	1070,0	0,668	546,3	2721	2174	1,63	7,03

Продолжение таблицы П.5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
140	3,6136	1080,1	0,509	589,1	2734	2145	1,74	6,93
150	4,7597	1090,8	0,393	632,2	2746	2114	1,84	6,84
160	6,1804	1102,2	0,307	675,5	2758	2082	1,94	6,75
170	7,9202	1114,5	0,243	719,1	2768	2049	2,04	6,67
180	10,027	1127,5	0,194	763,1	2777	2014	2,14	6,58
190	12,552	1141,5	0,156	807,5	2785	1977	2,24	6,51
200	15,551	1156,5	0,127	852,4	2791	1939	2,33	6,43

Таблица П.6. Насыщенный водяной пар (по давлениям)

Таблица приводится с сокращением

р, бар	t, °C	Уд. объем		Энтальпия		r	Энтропия	
		$v' \cdot 10^6$	$v''$	$h'$	$h''$		$s'$	$s''$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,010	6,982	1000,1	129,2	29,33	2513,8	2484,5	0,106	8,976
0,020	17,511	1001,2	67,01	73,45	2533,2	2459,8	0,261	8,724
0,025	21,094	1002,0	54,26	88,44	2539,7	2451,3	0,312	8,643
0,030	24,098	1002,7	45,67	101,0	2545,2	2444,2	0,354	8,578
0,035	26,692	1003,3	39,48	11,8	2549,9	2438,1	0,391	8,522
0,040	28,981	1004,0	34,80	121,4	2554,1	2432,7	0,422	8,475
0,050	32,90	1005,2	28,20	137,8	2561,2	2423,4	0,476	8,395
0,100	45,83	1010,2	14,68	191,8	2584,4	2392,6	0,649	8,151
0,200	60,09	1017,2	7,652	251,5	2609,6	2358,1	0,832	7,909
0,50	81,35	1030,1	3,242	340,6	2646,0	2305,4	1,091	7,595
1,00	99,63	1043,4	1,695	417,5	2675,7	2258,8	1,303	7,361
1,2	104,81	1047,6	1,429	439,4	2683,8	2244,4	1,361	7,299
1,4	109,32	1051,3	1,237	458,4	2690,8	2232,4	1,411	7,248

## Продолжение таблицы П.6.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,6	113,32	1054,7	1,092	475,4	2696,8	2221,4	1,455	7,203
1,8	116,93	1057,9	0,978	490,7	2702,1	2211,4	1,494	7,164
2,0	120,23	1060,8	0,886	504,7	2706,9	2202,2	1,530	7,129
2,2	123,27	1063,6	0,810	517,6	2711,3	2193,7	1,563	7,097
2,4	126,09	1066,3	0,747	529,6	2715,3	2185,7	1,593	7,068
2,6	128,73	1068,8	0,693	540,9	2719,0	2178,1	1,621	7,041
2,8	131,20	1071,2	0,646	551,4	2722,3	2170,9	1,647	7,0161
3,0	133,54	1073,5	0,606	561,4	2725,5	2164,1	1,672	6,993
4,0	143,62	1083,9	0,462	604,7	2738,5	2133,8	1,776	6,897
5,0	151,85	1092,8	0,375	640,1	2748,5	2108,4	1,860	6,822
6,0	158,84	1100,9	0,316	670,4	2756,4	2086,0	1,931	6,760
7,0	166,96	1108,2	0,273	697,1	2762,9	2065,8	1,992	6,707
8,0	170,42	1115,0	0,240	720	2868,4	2047,5	2,046	6,662
9,0	175,35	1121,3	0,215	742,6	2773,0	2030,4	2,094	6,621
10,0	179,88	1127,4	0,194	762,6	2778,0	2006,7	2,138	6,585
15,0	198,28	1153,8	0,132	844,7	2790,4	1945,7	2,314	6,442
20,0	212,37	1176,6	0,100	908,6	2797,4	1888,8	2,447	6,337
40,0	250,33	1252,1	0,050	1088	2799,4	1711,9	2,797	6,067
45,0	257,41	1269,1	0,044	1122	2796,5	1674,3	2,861	6,017
50,0	263,92	1285,8	0,039	1155	2792,8	1638,2	2,921	5,971
40,0	250,33	1252,1	0,050	1088	2799,4	1711,9	2,797	6,067
100	310,96	1452,6	0,018	1409	2724,4	1315,8	3,362	5,614
110	318,04	1488,7	0,016	1451	2705,4	1254,2	3,432	5,553
120	324,64	1526,7	0,014	1493	2684,8	1192,2	3,499	5,493
40,0	250,33	1252,1	0,050	1088	2799,4	1711,9	2,797	6,067
45,0	257,41	1269,1	0,044	1122	2796,5	1674,3	2,861	6,017

## Продолжение таблицы П.6.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
50,0	263,92	1285,8	0,039	1155	2792,8	1638,2	2,921	5,971
60,0	275,56	1318,7	0.032	1214	2783,3	1569,4	3,028	5,888
70,0	285,80	1351,4	0.027	1268	2771,4	1503,7	3.123	5,813
80,0	294,98	1384,3	0.023	1318	2757.5	1440,0	3,208	5,743
90,0	303,31	1417,0	0.020	1364	2741,8	1377,6	3,288	5,677
100	310,96	1452,6	0.018	1409	2724,4	1315,8	3,362	5,614
110	318.04	1488,7	0.016	1451	2705,4	1254,2	3,432	5,553
120	324,64	1526.7	0.014	1493	2684.8	1192,2	3,499	5,493
130	330,81	1567,0	0,013	1533	2662,4	1129,4	3,563	5,433
140	336,63	1610,4	0,011	1573	2638,3	1065,5	3,626	5,374
150	342,12	1658,0	0,010	1612	2611,6	999,4	3,688	5,312
160	347,32	1710,1	0,009	1652	2582,7	931,2	3,749	5,250
170	352,26	1769,0	0,008	1692	2550,8	859,2	3,810	5,184
180	356,96	1838,0	0,008	1733	2514,4	781,0	3,874	5,114
190	361,44	1923,1	0,007	1778	2470,1	691,2	3,942	5,032
200	365,71	2038,0	0,006	1829	2413,8	585,0	4,018	4,934
210	369,79	2218,0	0,005	1892	2340,2	448,0	4,114	4,811
220	373,68	2675,0	0,004	2008	2192,8	184,8	4,289	4,575
221	374,06	2864,0	0,003	2045	2147,6	102,6	4,346	4,505

Параметры критического состояния

Давление 221,15 бар

Температура 374,12 °С

Удельный объем 0,003147 м<sup>3</sup>/кг

Удельная энтальпия 2095,2 кДж/кг

Удельная энтропия 4,4237 кДж/(кг·К)

Таблица П.7. Вода и перегретый водяной пар

Таблица приводится с сокращением

t, °C	p=0,01 бар			p=0,02 бар			p=0,03 бар		
	t <sub>н</sub> "=6,982; h <sup>"</sup> =2513 v <sup>"</sup> =129,3 s <sup>"</sup> =8,976			t <sub>н</sub> "=17,511; h <sup>"</sup> =2533 v <sup>"</sup> =67,001; s <sup>"</sup> =8,724			t <sub>н</sub> "=24,098; h <sup>"</sup> =2545 v <sup>"</sup> =45,668; s <sup>"</sup> =8,578		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	<u>0,001</u>	<u>0</u>	<u>0</u>	0,001	0,0	0,0	0,001	0,0	0,0
10	130,6	2519,5	8,996	<u>0,001</u>	<u>42,0</u>	<u>0,151</u>	0,001	42,0	0,151
20	135,2	2538,1	9,060	<u>67,58</u>	2537,8	8,739	<u>0,001</u>	<u>83,9</u>	<u>0,296</u>
30	139,9	2556,8	9,123	69,90	2556,5	8,802	46,58	2556,3	8,615
50	149,1	2594,2	9,243	74,53	2594,0	8,922	49,67	2593,8	8,734
100	172,2	2688,3	9,513	86,08	2688,2	9,193	57,38	2688,1	9,006

Продолжение таблицы П.7

t, °C	p=0,05 бар			p=0,1 бар			p=0,5 бар		
	t <sub>н</sub> "=32,90; h <sup>"</sup> =2561,2 v <sup>"</sup> =28,196; s <sup>"</sup> =8,395			t <sub>н</sub> "=45,83; h <sup>"</sup> =2584,4 v <sup>"</sup> =14,676; s <sup>"</sup> =8,151			t <sub>н</sub> "=81,35; h <sup>"</sup> =2646,0 v <sup>"</sup> =3,242 s <sup>"</sup> =7,595		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,001	<u>0</u>	<u>0</u>	0,001	0,0	0,0	0,001	0,0	0,0
20	0,001	83,9	0,151	0,001	83,9	0,296	0,001	83,9	0,296
30	<u>0,001</u>	<u>125,7</u>	<u>0,437</u>	0,001	125,7	0,437	0,001	125,7	0,437
40	28,86	2574,6	8,439	<u>0,001</u>	<u>167,4</u>	<u>0,572</u>	0,001	167,5	0,572
50	29,78	2593,4	8,498	14,87	2592,3	8,175	0,001	209,3	0,704
60	30,71	2612,3	8,555	15,34	2611,3	8,233	0,001	251,1	0,831
70	31,64	2631,1	8,611	15,80	2630,3	8,289	0,001	293,0	0,955
80	32,57	2650,0	8,665	16,27	2649,3	8,344	<u>0,001</u>	<u>334,9</u>	<u>1,075</u>
90	33,49	2668,9	8,718	16,93	2668,3	8,397	3,324	2663,0	7,643
100	34,42	2687,9	8,769	17,20	2687,3	8,448	3,419	2682,6	7,696
120	36,27	2725,9	8,869	18,12	2725,4	8,548	3,608	2721,7	7,798
140	38,12	2764,0	8,963	19,05	2763,6	8,643	3,796	2760,6	7,894
160	39,97	2802,3	9,054	19,98	2802,0	8,733	3,983	2799,5	7,986
180	41,81	2840,8	9,141	20,90	2840,6	8,820	4,170	2838,4	8,074
200	43,66	2879,5	9,224	21,82	2879,3	8,904	4,356	2877,5	8,158



Продолжение таблицы П.7

t, °C	p=1,0 бар			p=2,0 бар			p=5,0 бар		
	t <sub>H</sub> "=99,63; h <sub>H</sub> "=2675,7 v <sub>H</sub> "=1,695; s <sub>H</sub> "=7,3608			t <sub>H</sub> "=120,23; h <sub>H</sub> "=2706,9 v <sub>H</sub> "=0,8859; s <sub>H</sub> "=7,1286			t <sub>H</sub> "=151,85; h <sub>H</sub> "=2748,5 v <sub>H</sub> "=0,3748; s <sub>H</sub> "=6,8215		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,001	0	0	0,001	0,2	0,0	0,001	0,5	0,0
50	0,001	209,3	0,704	0,001	209,4	0,703	0,001	209,7	0,703
90	<u>0,001</u>	<u>377,0</u>	<u>1,193</u>	0,001	377,0	1,307	0,001	377,3	1,192
100	1,696	2676,5	7,363	0,001	419,1	1,307	0,001	419,4	1,306
120	1,793	2716,8	7,468	<u>0,001</u>	<u>503,7</u>	<u>1,528</u>	0,001	503,9	1,527
130	1,841	2736,8	7,518	0,910	2727,6	7,180	0,001	546,5	1,634
140	1,889	2756,6	7,567	0,93	2748,4	7,231	0,001	589,2	1,739
150	1,937	2776,4	7,614	0,959	2769,0	7,281	<u>0,001</u>	<u>632,2</u>	<u>1,842</u>
160	1,984	2796,2	7,661	0,984	2789,5	7,329	0,384	2767,3	6,865
180	2,078	2835,7	7,749	1,033	2830,1	7,420	0,405	2812,1	6,997
200	2,172	2875,2	7,835	1,080	2870,5	7,507	0,425	2855,5	7,060
250	2,406	2874,	8,034	1,199	2970,9	7,709	0,474	2960,7	7,272

Продолжение таблицы П.7

t, °C	p=10,0 бар			p=15,0 бар			p=20,0 бар		
	t <sub>H</sub> "=179,88; h <sub>H</sub> "=2777,0 v <sub>H</sub> "=19,43; s <sub>H</sub> "=6,5847			t <sub>H</sub> "=198,28; h <sub>H</sub> "=2790,4 v <sub>H</sub> "=0,1317; s <sub>H</sub> "=6,4418			t <sub>H</sub> "=212,37; h <sub>H</sub> "=2797,4 v <sub>H</sub> "=0,0995 s <sub>H</sub> "=6,3373		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,001	1,0	0	0,001	1,5	0,0	0,001	2,0	0,0
50	0,001	210,1	0,703	0,001	210,6	0,703	0,001	211,2	0,703
100	0,001	419,7	1,306	0,001	420,1	1,306	0,001	420,5	1,305
150	0,001	632,5	1,841	0,001	632,8	1,841	0,001	633,1	1,839
160	0,001	675,7	1,942	0,001	676,0	1,941	0,001	676,3	1,941
170	<u>0,001</u>	<u>719,2</u>	<u>2,041</u>	0,001	719,5	2,041	0,001	719,8	2,040
180	0,194	2777,3	6,585	0,001	763,4	2,139	0,001	763,6	2,138
190	0,200	2802,9	6,641	<u>0,001</u>	<u>807,6</u>	<u>2,235</u>	0,001	807,9	2,235
200	0,206	2827,5	6,694	0,132	2795,3	6,452	0,001	852,6	2,330
210	0,212	2851,5	6,744	1,137	2822,9	6,510	<u>0,001</u>	<u>897,8</u>	<u>2,425</u>

Продолжение таблицы П. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
220	0,217	2874,9	6,792	0,141	2849,2	6,534	0,102	2820,4	6,384
250	0,233	2942,8	6,926	0,152	2923,4	6,71	0,112	2902,5	6,546
300	0,258	3051,3	7,124	0,16	3037,9	6,910	0,126	3024,0	6,768

Продолжение таблицы П.7

t, °C	p=35 бар			p=40,0 бар			p=60,0 бар		
	t <sub>н</sub> "=242,54; h <sub>н</sub> "=2801,3 v <sub>н</sub> "=0,0570; s <sub>н</sub> "=6,1218			t <sub>н</sub> "=250,33; h <sub>н</sub> "=2799,4 v <sub>н</sub> "=0,0497; s <sub>н</sub> "=6,0670			t <sub>н</sub> "=275,56; h <sub>н</sub> "=2783,3 v <sub>н</sub> "=0,03241; s <sub>н</sub> "=5,8878		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,001	3,5	0	0,001	4,0	0	0,001	6,1	0,0
50	0,001	212,3	0,702	0,001	212,7	0,702	0,001	214,4	0,701
100	0,001	421,6	1,304	0,001	422,0	1,304	0,001	423,5	1,302
200	0,001	853,2	2,328	0,001	853,4	2,327	0,001	854,2	2,324
240	<u>0,001</u>	<u>1037,7</u>	<u>2,702</u>	0,001	1037,7	2,701	0,001	1037,9	2,693
250	0,059	2828,1	6,173	<u>0,001</u>	<u>1085,8</u>	<u>2,794</u>	0,001	1085,8	2,789
260	0,061	2861,6	6,237	0,052	2835,6	6,136	0,001	1134,8	2,882
270	0,063	2892,9	6,295	0,054	2870,1	6,199	<u>0,001</u>	<u>1185,2</u>	<u>2,975</u>
280	0,065	2922,6	6,349	0,055	2902,2	6,258	0,033	2804,0	5,925
290	0,067	2950,9	6,400	0,057	2932,5	6,313	0,035	2846,5	6,002
300	0,068	2978,2	6,448	0,059	2961,5	6,363	0,036	2885,0	6,069
350	0,077	3104,6	6,660	0,066	3093,1	6,584	0,042	3043,9	6,336
400	0,085	3223,1	6,843	0,073	3214,5	6,771	0,047	3178,6	6,544
450	0,092	3337,6	7,001	0,080	3330,7	6,938	0,052	3302,6	6,721
500	0,099	3450,8	7,158	0,086	3445,2	7,091	0,057	3422,2	6,881

Продолжение таблицы П.7

t, °C	p=80,0 бар			p=90,0 бар			p=130,0 бар		
	t <sub>H</sub> "=294,98; h <sub>H</sub> "=2757,5 v <sub>H</sub> "=0,0235; s <sub>H</sub> "=5,7430			t <sub>H</sub> "=303,31; h <sub>H</sub> "=2741,8 v <sub>H</sub> "=0,02046; s <sub>H</sub> "=5,6773			t <sub>H</sub> "=330,81; h <sub>H</sub> "=2662,4 v <sub>H</sub> "=0,01277; s <sub>H</sub> "=5,4333		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
0	0,001	8,1	0,0	0,001	9,1	0,001	0,001	13,1	0
100	0,001	425,0	1,301	0,001	425,8	1,300	0,001	428,8	1,297
200	0,001	855,1	2,321	0,001	855,5	2,319	0,001	857,2	2,313
250	0,001	1085,8	2,784	0,001	1085,9	2,782	0,001	1086,1	2,773
280	0,001	1236,2	3,063	0,001	1235,6	3,060	0,001	1233,9	3,047
290	0,001	1289,8	3,159	0,001	1289,0	3,156	0,001	1286,1	3,141
300	0,024	2785,4	5,792	0,001	1344,9	3,254	0,001	1340,5	3,237
310	0,027	2834,7	5,877	0,021	2781,8	5,746	0,001	1397,8	3,336
330	0,028	2917,5	6,017	0,024	2878,7	5,910	0,001	1526,9	3,553
350	0,030	2988,3	6,132	0,026	2957,5	6,038	0,015	2804,0	5,664
400	0,034	3140,1	6,367	0,030	3119,7	6,289	0,019	3029,3	6,013
500	0,042	3398,5	6,725	0,037	3386,4	6,659	0,024	3336,1	6,440

**Примечание:** размерности величин в таблицах приложения П.5, П.6, 7:

- v', v'' - удельные объемы кипящей воды и сухого насыщенного пара, м<sup>3</sup>/кг;

- h', h'' - энтальпии кипящей воды и водяного пара. кДж/кг; s', s'' - энтропии кипящей воды и водяного пара. кДж/(кг·К);

- r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг.