

2011

# Теплотехника

Контрольные вопросы и тексты задач к  
практическим занятиям

Кац П.Б.  
БрГУ им. А.С. Пушкина  
Брест 2011



**Учреждение образования  
«Брестский государственный университет им. А.С. Пушкина»**

Кафедра общей физики

**ТЕПЛОТЕХНИКА**

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ТЕКСТЫ ЗАДАЧ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ**

Для студентов биологического факультета

РЕПОЗИТОРИЙ БРГУ

УДК 536(076)  
ББК 22.34

*Составитель:*

Кандидат физико-математических наук, доцент  
**П.Б. Кац**

*Рецензент:*

кандидат физико-математических наук, доцент  
**В.С. Секержицкий**

В методических указаниях к каждому из 8 занятий даны вопросы, изучение которых позволит студенту подготовиться к решению задач. Содержание и последовательность вопросов отражает логическую структуру занятий. Приведены тексты минимума типовых задач, решение которых необходимо освоить студентам. Указана необходимая литература и имеются таблицы величин, необходимых для решения задач.

**УДК 535(07)**  
**ББК 22.34**

## Занятие 1

Тема: Параметры состояния. Уравнение состояния идеальных газов.

Вопросы

Термодинамические параметры состояния. Идеальный газ. Давление и единицы его измерения. Вакуум. Температура. Температурные шкалы. Удельный объем и плотность. Уравнение состояния. Уравнение состояния идеального газа.

1. В сосуде объемом 900 литров находится 1,5 кг окиси углерода. Определить удельный объем и плотность окиси углерода при этих условиях (Ответ:  $v=0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\rho=1,67 \text{ кг}/\text{м}^3$ )
2. В паросборнике находится 300 кг водяного пара. Определить объем паросборника в метрах кубических, если удельный объем пара  $20,2 \text{ см}^3/\text{г}$  (Ответ:  $6,06 \text{ м}^3$ )
3. Определить абсолютное давление в сосуде, если показание присоединенного к нему ртутного манометра равно  $66,7 \text{ кПа}$ , а атмосферное давление составляет  $750 \text{ мм рт. ст.}$  (Ответ:  $0,1667 \text{ МПа.}$ ) Величину поправки на тепловое расширение ртути см. в приложении.
4. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление  $0,04 \text{ ат.}$  Показания барометра  $750 \text{ мм. рт. ст.}$  Найти показания вакуумметра, градуированного в паскалях. ( $96,07 \text{ кПа}$ )
5. Температура пара после прохождения его через пароперегреватель котельного агрегата увеличилась на  $450^\circ\text{F}$ . Чему равно увеличение температуры пара, выраженное в  $^\circ\text{C}$ ? (Ответ:  $250^\circ\text{C}$ )
6. Термометры показывают  $315^\circ\text{C}$  и  $-440^\circ\text{F}$ . Каковы в этих случаях значения абсолютных температур? (Ответ:  $588,15\text{K}$ ,  $10,93\text{K}$ )
7. Найти плотность и удельный объем двуокиси углерода при нормальных условиях (Ответ:  $v_n=0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\rho_n=1,964 \text{ кг}/\text{м}^3$ )
8. Определить массу углекислого газа в сосуде объемом  $4 \text{ м}^3$  при  $t=80^\circ\text{C}$ . Давление газа по манометру равно  $0,04 \text{ МПа}$ . Барометрическое давление  $103990 \text{ Па}$ . (Ответ:  $8,6 \text{ кг}$ )
9. Найти газовую постоянную для кислорода, водорода и метана. (Ответ:  $259,8$ ;  $4124$ ;  $518,8 \text{ Дж}/\text{кг}\cdot\text{K}$ )
10. Баллон с кислородом емкостью  $20 \text{ л}$  находится под давлением  $10 \text{ МПа}$  при  $15^\circ\text{C}$ . После израсходования части кислорода давление понизилось до  $7,6 \text{ МПа}$ , а температура упала до  $10^\circ\text{C}$ . Определить массу израсходованного кислорода. (Ответ:  $0,607 \text{ кг}$ )
11. Во сколько раз больше воздуха (по массе) вмещает резервуар при  $10^\circ\text{C}$ , чем при  $50^\circ\text{C}$ , если давление остается неизменным? (Ответ: в  $1,14$  раз)
12. Определить необходимый объем азостата, наполненного водородом, если подъемная сила, которую он должен иметь на высоте  $7$

км, равна 39240Н. Принять на данной высоте  $p=41$  кПа,  $t=-30^{\circ}\text{C}$ . (Ответ:  $7311\text{ м}^3$ )

13. Газохранилище объемом  $100\text{ м}^3$  наполнено газом коксовых печей. Определить массу газа в газохранилище, если  $t=20^{\circ}\text{C}$ , атмосферное давление  $100$  кПа, а показания манометра, установленного на газохранилище  $133,3$  кПа. Газовую постоянную коксового газа принять равной  $721\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ . (Ответ:  $110,4\text{ кг}$ )

14. По трубопроводу протекает  $10\text{ м}^3/\text{с}$  кислорода при температуре  $127^{\circ}\text{C}$  и давлении  $0,4\text{ МПа}$ . Определить массовый расход газа. (Ответ:  $38,5\text{ кг/с}$ )

15. Поршневой компрессор всасывает в минуту  $3$  кубометра воздуха при  $t=17^{\circ}\text{C}$  и барометрическом давлении  $100$  кПа и нагнетает его в резервуар, объем которого равен  $8,5$  кубометров. За сколько минут компрессор поднимет давление в резервуаре до  $0,7\text{ МПа}$ , если температура в нем будет оставаться постоянной. Начальное давление воздуха в резервуаре составляло  $100$  кПа при температуре  $17^{\circ}\text{C}$ . (Ответ:  $17$  минут)

16. Паротурбинная установка мощностью  $100000\text{ кВт}$  расходует  $0,37\text{ кг}$  топлива на  $1\text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . Какова должна быть массовая производительность (кг/ч) вентиляторов, подающих воздух в топку котла, если для сжигания  $1\text{ кг}$  топлива требуется  $15\text{ м}^3$  воздуха при нормальных условиях? (Ответ:  $718\text{ т/ч}$ )

17.  $0,3\text{ м}^3$  кислорода находится в сосуде емкостью  $650\text{ см}^3$ . Определить показания манометра, измеряющего давление в этом сосуде, если температура кислорода равна  $200^{\circ}\text{C}$ . Атмосферное давление  $762\text{ мм рт. ст.}$  (Ответ:  $80,9\text{ МПа}$ )

## Занятие 2

Тема: Процессы изменения состояния идеальных газов. Теплоемкость.

### Вопросы

Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные термодинамические процессы. Внутренняя энергия. Внутренняя энергия идеальных газов. Работа расширения газа. Техническая работа и ее изображение на диаграмме состояния. Теплота. Теплота и работа, как функции процесса. Аналитическое выражение первого закона термодинамики. Энтальпия. Свойства энтальпии, как функции состояния. Выражение первого закона термодинамики через энтальпию. Определение теплоемкости. Виды теплоемкости. Изохорная и изобарная теплоемкости. Уравнение Майера. Энтальпия идеального газа. Теплоемкость идеальных газов по классической теории теплоемкости. Средняя теплоемкость. Энтропия. Изменение энтропии в обратимых процессах. Адиабатный процесс. Уравнение Пуассона через различные параметры.

1. В цилиндре с подвижным поршнем находится  $0,8 \text{ м}^3$  воздуха при давлении  $0,5 \text{ МПа}$ . Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до  $0,8 \text{ МПа}$  температура воздуха не изменилась? (Ответ:  $0,5 \text{ м}^3$ )

2. Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с  $1200$  до  $250^\circ\text{C}$ . Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газопроводов одинаковое (Ответ: в  $2,82$  раза)

3. Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра уменьшится от  $1,8 \text{ МПа}$  до  $0,3 \text{ МПа}$ ? Барометрическое давление принять равным  $0,1 \text{ МПа}$ . (Ответ: уменьшится в  $4,75$  раза)

4. В воздухоподогреватель парового котла подается вентилятором  $130000 \text{ м}^3/\text{ч}$  воздуха при температуре  $30^\circ\text{C}$ . Определить объемный расход воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если он нагревается до  $400^\circ\text{C}$  при постоянном давлении (Ответ:  $288667 \text{ м}^3/\text{ч}$ )

5. Углекислый газ с начальной температурой  $25^\circ\text{C}$  сжимается в одноступенчатом поршневом компрессоре от давления  $0,1 \text{ МПа}$  до  $1 \text{ МПа}$  адиабатически. Производительность компрессора  $1,5 \text{ т/ч}$ . Определить начальные и конечные параметры газа, изменение удельных внутренней энергии, энтальпии и энтропии, отведенную от газа удельную теплоту, удельную работу сжатия и техническую работу компрессора, теоретическую мощность компрессора. При расчете показателя адиабаты пользоваться классической теорией теплоемкости для идеального газа (Ответ:  $v_1=0,563 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2=0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $t_2=257^\circ\text{C}$ ;  $\Delta u=131,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta h=175,4 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta s=0$ ;  $q_{\text{отв}}=0$ ;  $l_{\text{сж}}=131,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $l_{\text{т}}=175,4 \text{ кДж/кг}$ ;  $N=73,08 \text{ кВт}$ )

6. В цилиндре с подвижным поршнем находится кислород при разрежении, равном  $320 \text{ мм рт. ст.}$  При постоянной температуре кислород сжимается до избыточного давления  $12 \text{ ат.}$  Барометрическое давление равно  $745 \text{ мм рт. ст.}$  Во сколько раз уменьшился объем кислорода (Ответ:  $22,5$ )

7. Определить численное значение коэффициента теплового расширения  $\alpha = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  для кислорода и окиси углерода при давлении  $1200 \text{ кПа}$  и температуре  $430^\circ\text{C}$ . (Ответ:  $1,422 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )

8. Найти объемную теплоемкость кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая, что применима классическая теория теплоемкости. (Ответ:  $927 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ ,  $1298 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$ )

9. Найти массовую теплоемкость кислорода при постоянном объеме и постоянном давлении, считая, что применима классическая теория теплоемкости. (Ответ:  $650 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ ,  $909 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ )

10. Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  для воздуха при постоянном давлении в пределах  $200-800^\circ\text{C}$ , считая зависимость

теплоемкости от температуры а) нелинейной (для возврата нажмите Alt left); б) линейной (Ответ: а) 1,091 кДж/кг·К, б) 1,089 кДж/(кг·К))

11. Вычислить среднюю теплоемкость  $c_{pm}$  для кислорода при постоянном давлении в пределах 350-1000°С, считая зависимость теплоемкости от температуры а) нелинейной; б) линейной (Ответ: а) 1,077 кДж/(кг·К), б) 1,063 кДж/(кг·К))

12. 6 м<sup>3</sup> воздуха при давлении 0,3 МПа и температуре 25°С нагревается при постоянном давлении до 130°С. Определить количество подведенной к воздуху теплоты, считая теплоемкость по классической теории теплоемкостей. (Ответ: 2,22 МДж)

13. В закрытом сосуде объемом 300 л находится воздух при давлении 0,8 МПа и температуре 20°С. Какое количество теплоты необходимо подвести для того, чтобы температура воздуха поднялась до 120°С? Задачу решить, принимая теплоемкость воздуха постоянной и учитывая нелинейную зависимость теплоемкости от температуры. Определить относительную ошибку, полученную в первом случае. (Ответ: 204,67 кДж, 205,67 кДж, 0,5%)

14. Воздух охлаждается от 1000°С до 100°С в процессе с постоянным давлением. Какое количество теплоты теряет 1 кг воздуха? Решить задачу для постоянной теплоемкости и для теплоемкости, нелинейно зависящей от температуры. Определить относительную ошибку, полученную в первом случае. (Ответ: 904,3 кДж, 990,1 кДж, 8,7%)

15. В подогревателе газовой турбины воздух нагревается от 150 до 600°С. Найти количество теплоты, сообщаемое воздуху в единицу времени, если расход его составляет 360 кг/ч. Зависимость теплоемкости от температуры принять нелинейной. (Ответ: 47,8 кДж/с)

16. Определить изменение внутренней энергии 0,4 кг азота при его расширении в цилиндре с подвижным поршнем, если в результате процесса температура азота падает от 500 до 150°С. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной (таблица 3), газ считать идеальным. Определить относительную ошибку, получаемую в случае, если полагать теплоемкость постоянной. (Ответ: -109,1 кДж, около 5%)

17. В компрессоре газовой турбины сжимается воздух. Начальная температура воздуха 30°С, конечная 150°С. Определить изменение удельной энтальпии воздуха в процессе сжатия, считая значения теплоемкостей по молекулярно-кинетической теории. Воздух считать идеальным газом. (Ответ: 120,35 Дж/кг)

## Занятие 3

Тема: Свойства пара и жидкости. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара.

Вопросы

Теплота фазового перехода. Насыщенный и перегретый пар. Влажный пар, как двухфазное состояние. Степень сухости. Парообразование при неизменном давлении. Термодинамические параметры воды и водяного пара. Основные термодинамические процессы изменения состояния воды и водяного пара. Первый закон термодинамики для процессов.

1. Определить температуру, удельный объем, плотность, энтальпию и энтропию сухого насыщенного пара при давлении 1 МПа.
2. Найти состояние водяного пара, если его давление 1,2 МПа, а удельный объем  $0,18 \text{ м}^3/\text{кг}$ . (Ответ: пар перегрет)
3. Найти состояние водяного пара, если его давление 2,9 МПа, а удельная энтропия  $6,15 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . (Ответ: пар влажный насыщенный).
4. Найти удельный объем влажного пара, если давление 2 МПа, а степень сухости 0,9 (Ответ:  $0,089695 \text{ м}^3/\text{кг}$ )
5. Определить внутреннюю энергию сухого насыщенного пара при давлении 1,5 МПа. (Ответ:  $2593 \text{ кДж}/\text{кг}$ )
6. Определить энтальпию и внутреннюю энергию влажного насыщенного пара при давлении 1,3 МПа и степени сухости 0,98. ( $2746,6 \text{ кДж}/\text{кг}$ ;  $2554,0 \text{ кДж}/\text{кг}$ )
7. Найти массу, энтальпию, внутреннюю энергию, и энтропию  $6 \text{ м}^3$  насыщенного водяного пара при давлении 1,2 МПа и степени сухости пара 0,9. (Ответ:  $40,8 \text{ кг}$ ,  $105510 \text{ кДж}$ ,  $98310 \text{ кДж}$ ,  $248,6 \text{ кДж}/\text{К}$ )
8. Водяной пар имеет параметры  $p = 9 \text{ МПа}$   $t = 500^\circ \text{ С}$ . Определить значения остальных параметров. (Ответ:  $\rho = 27,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $u = 3055,7 \text{ кДж}/\text{кг}$ )
9. Определить количество теплоты, затрачиваемой на перегрев 1 кг влажного пара при давлении 10 МПа и степени сухости 0,98 до температуры  $480^\circ \text{ С}$ . (Ответ:  $624,2 \text{ кДж}$ )
10. Через пароперегреватель парового котла проходит 5000 кг пара в час. Степень сухости пара до пароперегревателя 0,99, а давление 10 МПа. Температура пара после пароперегревателя  $t = 550^\circ \text{ С}$ . Определить количество теплоты, воспринятой пароперегревателем, принимая его к. п. д. равным 0,984. (Ответ:  $4,0 \text{ ГДж}/\text{ч}$ )
11. Определить диаметр паропровода, по которому протекает пар при давлении 1,8 МПа. Расход пара  $1,11 \text{ кг}/\text{с}$ , скорость пара  $20 \text{ м}/\text{с}$ . Степень сухости 0,9. (Ответ:  $d = 85 \text{ мм}$ )
12. В паровом котле объемом  $12 \text{ м}^3$  находятся 1800 кг воды и пара при давлении 11 МПа и температуре насыщения. Определить массы воды и сухого насыщенного пара. (Ответ:  $1156,4 \text{ кг}$ ;  $643,6 \text{ кг}$ )



13.В пароперегреватель парового котла поступает пар в количестве 20 т/ч при давлении 4 МПа и со степенью сухости 0,98. Количество теплоты, сообщенной пару в пароперегревателе, составляет 11 310 МДж/ч. Определить температуру пара на выходе из пароперегревателя. Процесс считать изобарным. (Ответ: 450°C)

Репозиторий БРГУ

## Занятие 4

Тема:  $h$ - $s$ -диаграмма водяного пара. Процессы с паром. Влажный воздух.  $h$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха.

Вопросы

$T$ - $s$  и  $h$ - $s$ -диаграммы для воды и водяного пара. Представление основных термодинамических процессов на  $p$ - $v$ ,  $T$ - $s$  и  $h$ - $s$ -диаграммах состояний. Дросселирование газов и паров. Уравнение процесса дросселирования. Исследование процесса дросселирования с помощью  $h$ - $s$ -диаграммы. Влажный воздух и его параметры: абсолютная и относительная влажность, точка росы, влагосодержание. Энтальпия влажного воздуха. Психрометр.  $h$ - $d$ -диаграмма влажного воздуха. Процессы изменения состояния влажного воздуха и их представление на  $h$ - $d$ -диаграмме: нагревание, охлаждение, адиабатное испарение. Процесс сушки.

1. Задано состояние пара:  $p=1,6$  МПа,  $x=0,96$ . Определить остальные параметры, пользуясь  $h$ - $s$ -диаграммой и сравнить их со значениями, полученными с помощью таблиц водяного пара. (Ответ:  $t_n=201,37^\circ\text{C}$ ,  $h_x=2716$  кДж/кг,  $s_x=6,26$  кДж/(кг·К),  $v_x=0,12$  м<sup>3</sup>/кг)

2. Пользуясь  $h$ - $s$ -диаграммой водяного пара, определить энтальпию пара: а) сухого насыщенного при давлении 1 МПа; б) перегретого при  $p=2,9$  МПа и  $t=300^\circ\text{C}$ . (Ответ: 2778 кДж/кг; 3048 кДж/кг)

3. Задано состояние пара:  $p=2$  МПа,  $t=340^\circ\text{C}$ . Определить, пользуясь  $h$ - $s$ -диаграммой  $h$ ,  $s$  и перегрев пара. (Ответ: 3110 кДж/кг,  $s=6,91$  кДж/(кг·К),  $\Delta t=128^\circ\text{C}$ )

4. Влажный пар имеет при давлении 1,5 МПа степень сухости 0,80. Какое количество теплоты нужно сообщить 1 кг данного пара, чтобы довести его степень сухости при постоянном давлении до 0,95? (Ответ: 292 кДж)

5. Один килограмм водяного пара при давлении 1 МПа и температуре  $240^\circ\text{C}$  нагревается при постоянном давлении до  $320^\circ\text{C}$ . Определить затраченное количество теплоты, работу расширения и изменение внутренней энергии пара. (173,5 кДж; 40,3 кДж; 133,2 кДж)

6. В закрытом сосуде содержится один кубометр сухого насыщенного водяного пара при давлении 1 МПа. Определить давление, степень сухости пара и количество отданной им теплоты, если он охладится до  $60^\circ\text{C}$ . (19919 Па; 0,0252; 11714 кДж.)

7. Определить количество теплоты, которое нужно сообщить 6 кг водяного пара, занимающего объем 0,6 м<sup>3</sup> при давлении 0,6 МПа, чтобы при постоянном объеме повысить его давление до 1 МПа. Найти конечную степень сухости пара. (Ответ:  $x=0,512$ ;  $Q=2564$  кДж)

8. Отработавший пар из паровой машины направляется в конденсатор. Состояние отработавшего пара:  $p=0,1$  бар,  $x=0,83$ . Какое количество воды для охлаждения необходимо подавать в конденсатор, если температура ее

повышается на  $15^{\circ}\text{C}$ , а конденсат забирается из конденсатора при температуре  $35^{\circ}\text{C}$ ? (Ответ:  $32,3 \text{ кг/кг}$ )

9.  $2 \text{ кг}$  пара при давлении  $1,9079 \text{ МПа}$  и степени сухости  $0,7$  изотермически расширяется до  $1 \text{ МПа}$ . Определить конечные параметры, количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и работу расширения. (Ответ:  $V_2=0,423 \text{ м}^3$ ,  $Q=1,52 \text{ МДж}$ ,  $\Delta U=1,106 \text{ МДж}$ ,  $L=409 \text{ кДж}$ )

10.  $10 \text{ кг}$  пара расширяется адиабатно от начальных параметров  $p_1=3 \text{ МПа}$ ,  $t_1=300^{\circ}\text{C}$  до  $p_2=0,05 \text{ МПа}$ . Найти степень сухости полученного пара и работу расширения. (Ответ:  $0,838$ ;  $6,14 \text{ МДж}$ )

11. Пар при давлении  $10 \text{ МПа}$  и температуре  $320^{\circ}\text{C}$  дросселируется до давления  $3 \text{ МПа}$ . Определить состояние пара в конце дросселирования. (Ответ:  $x=0,99$ ;  $\Delta t=-85^{\circ}\text{C}$ )

12. До какого давления необходимо дросселировать пар при  $p_1=6 \text{ МПа}$  и  $x_1=0,96$ , чтобы он стал сухим насыщенным? (Ответ:  $0,27 \text{ МПа}$ )

13. Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем  $0,03 \text{ МПа}$ , а температура  $80^{\circ}\text{C}$ . Барометрическое давление  $760 \text{ мм рт. ст.}$ . Посчитать абсолютную влажность, считая водяной пар идеальным газом. (Ответ:  $0,185 \text{ кг/м}^3$ ;  $0,184 \text{ кг/м}^3$ )

14. Определить влагосодержание воздуха при температуре  $60^{\circ}\text{C}$  и барометрическом давлении  $99325 \text{ Па}$  ( $745 \text{ мм рт. ст.}$ ) вычислением и по  $h$ -диаграмме, если относительная влажность воздуха  $60\%$ . (Ответ:  $85,1 \text{ г/кг}$ )

15. Парциальное давление пара в атмосферном воздухе  $0,2 \text{ бара}$ . Температура воздуха  $70^{\circ}\text{C}$ . Определить относительную влажность воздуха по точным и по приближенным формулам. (Ответ:  $64,03\%$ ;  $64,18\%$ )

16. Наружный воздух, имеющий температуру  $20^{\circ}\text{C}$  и влагосодержание  $6 \text{ г/кг}$  подогрели до  $45^{\circ}\text{C}$ . Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха по приближенным формулам и по  $h$ -диаграмме. Барометрическое давление  $1 \text{ бар}$ . (Ответ:  $40,9\%$ ;  $9,97\%$ )

17. Во влажный воздух с параметрами  $t=75^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=10\%$  испаряется вода при адиабатных условиях. Температура воздуха при этом понижается до  $45^{\circ}\text{C}$ . Определить относительную влажность и влагосодержание воздуха в конечном состоянии. ( $\varphi=60\%$ ;  $d=37,5 \text{ г/кг}$ )

18. Для сушки макарон используется воздух при  $25^{\circ}\text{C}$  с  $\varphi=50\%$ . В воздушном подогревателе воздух нагревают до  $90^{\circ}\text{C}$  и направляют в сушилку, откуда он выходит при  $35^{\circ}\text{C}$ . Определить конечное влагосодержание воздуха, расход теплоты и воздуха на  $1 \text{ кг}$  испаренной влаги. Процесс насыщения влажного воздуха считать идеальным. ( $d_3=32 \text{ г/кг}$ ;  $3070 \text{ кДж/кг}$ ;  $45,5 \text{ кг/кг}$ )

## Занятие 5

Тема: Цикл паротурбинной установки.Вопросы

Принципиальная схема паротурбинной установки. Теоретический цикл паротурбинной установки (цикл Ренкина). Представление на диаграммах состояния и термический КПД. Влияние начальных и конечных параметров пара на КПД цикла Ренкина. Цикл паротурбинной установки с регенерацией тепла. Теплофикационный цикл. Упрощенная схема ТЭЦ.

1. Паросиловая установка работает по циклу Ренкина. Параметры начального состояния:  $p_1=2\text{МПа}$ ,  $t_1=300^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе  $p_2=0,004\text{ МПа}$ . Определить термический к.п.д. ( Ответ: 0,338)

2. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина с начальными параметрами  $p_1=100\text{ бар}$ ,  $t_1=530^\circ\text{C}$ . Давление в конденсаторе 0,04 бар. Определить термический к.п.д. установки и сравнить его с термическим к.п.д. цикла Карно при той же разности температур. (Ответ: 0,43; 0,62)

3. Найти мощность паровой машины, работающей по циклу Ренкина, при следующих условиях: при впуске пар имеет давление 1,5 МПа и температуру  $300^\circ\text{C}$ , давление пара при выпуске 0,01 МПа, часовой расход пара 940 кг/ч. (Ответ: 220 кВт)

4. Определить термический к.п.д. идеального цикла Ренкина при начальной температуре пара  $500^\circ\text{C}$  и конечном давлении 0,1 бар. Задачу решить, когда а) начальное давление 20 бар; б) начальное давление 100 бар. (Ответ: а) 0,34; б) 0,404)

5. Определить термический к.п.д. цикла Ренкина при начальной температуре пара  $500^\circ\text{C}$  и начальном давлении 40 бар. Задачу решить при конечном давлении а) 2 бар; б) 0,05 бар. (Ответ: а) 0,256; б) 0,388)

6. Сравнить термический к.п.д. идеального циклов Ренкина, работающих при одинаковых начальных и конечных давлениях 2МПа и 0,02МПа, если в одном случае пар влажный со степенью сухости 0,9, во втором сухой насыщенный, в третьем перегретый с температурой  $300^\circ\text{C}$ . (Ответ: 0,277; 0,2795; 0,287)

7. Определить, какова должна быть температура пара перед входом в турбину, если его давление при этом 10 МПа, давление в конденсаторе 0,004 МПа, а степень сухости на выходе из турбины не должна быть ниже 85%. (Ответ:  $t_1 > 740^\circ\text{C}$ )

8. На заводской теплоэлектростанции установлены две паровые турбины с противодействием мощностью 4000 кВт каждая. Весь пар из турбины направляется на производство, откуда он возвращается обратно в котельную в виде конденсата при температуре насыщения. Турбины работают при следующих параметрах:  $p_1=3,5\text{ МПа}$ ,  $t_1=435^\circ\text{C}$ ,  $p_2=0,12\text{ МПа}$ . Принимая, что установка работает по циклу Ренкина, определить часовой расход топлива, если к.п.д. котельной равен 0,84, а теплота сгорания топлива 28470 кДж/кг. (Ответ: 4,6 т/ч)

## Занятие 6

**Тема: Теплопроводность. Конвективный теплообмен. Расчет коэффициента теплоотдачи.**

Вопросы

Виды теплообмена. Основные понятия теории теплообмена. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности. Теплопроводность при стационарном режиме через однослойную и многослойную плоскую стенку, через цилиндрическую стенку. Конвективный теплообмен. Закон Ньютона-Рихмана. Свободная и вынужденная конвекция. Основы теории подобия и анализа размерностей. Основные критерии подобия теплообмена: число Рейнольдса, Нуссельта, Прандтля, Грасгофа. Критериальные уравнения конвективного теплообмена. Определяющий размер и определяющая температура. Теплоотдача при вынужденном движении в трубах. Уравнения подобия для ламинарного и турбулентного режимов. Эквивалентный диаметр труб некруглого сечения. Теплоотдача при естественной конвекции. Свободное движение около вертикальных и горизонтальных поверхностей. Естественная конвекция в замкнутом пространстве. Теплоотдача при кипении жидкости. Режимы кипения и интенсивность теплоотдачи. Теплоотдача при конденсации пара.

1. Определить тепловой поток через бетонную стенку здания толщиной 200 мм, высотой 2,5 м и длиной 2 м, если температура ее поверхностей  $20^{\circ}\text{C}$  и  $-10^{\circ}\text{C}$ , а коэффициент теплопроводности  $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  (Ответ: 750 Вт.)

2. Определить значение коэффициента теплопроводности материала стенки, если при толщине 30 мм и температурном напоре  $\Delta t=30^{\circ}\text{C}$  плотность теплового потока  $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . ( $0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ )

3. Определить плотность теплового потока через плоскую шамотную стенку толщиной 0,5 м, если на наружных поверхностях температуры соответственно  $t_1=1000^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2=0^{\circ}\text{C}$  и коэффициент теплопроводности шамота  $\lambda=1,0(1+0,001t) \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . (Ответ:  $3 \text{ кВт}/\text{м}^2$ )

4. Определить плотность теплового потока, проходящего через стенку котла, если ее толщина 20 мм, коэффициент теплопроводности материала  $50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . и с внутренней стороны стенка покрыта слоем котельной накипи толщиной 2 мм с коэффициентом теплопроводности  $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура наружной поверхности  $250^{\circ}\text{C}$ , а внутренней  $200^{\circ}\text{C}$ . (Ответ:  $20,8 \text{ кВт}/\text{м}^2$ )

5. Обмуровка печи состоит из слоев шамотного и красного кирпичей, между которыми расположена засыпка из диатомита.  $\delta_1=12 \text{ см}$ ,  $\delta_2=5 \text{ см}$ ,  $\delta_3=25 \text{ см}$ ,  $\lambda_1=0,93 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\lambda_2=0,14 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\lambda_3=0,7 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Какой толщины следует сделать слой из красного кирпича, если отказаться от засыпки из диатомита, чтобы тепловой поток через обмуровку остался неизменным (Ответ: 50 см)

6. Стальной трубопровод  $d_1=49$  мм,  $d_2=57$  мм нужно изолировать так, чтобы потери тепла были не более 300 кДж/ч на 1 метр трубопровода, а температура наружной поверхности изоляции не превышала  $55^\circ\text{C}$ . По трубопроводу протекает насыщенный пар при давлении 0,98 МПа. Изоляционный материал – асбестовая вата. Какова должна быть толщина изоляционного слоя?  $\lambda_{\text{стали}}=44,5$  Вт/(м·К),  $\lambda_{\text{ваты}}=0,07$  Вт/(м·К), (Ответ: больше 26,5 мм)

7. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенки трубы подогревателя воды. Длина трубы 2 м, внутренний диаметр 16 мм, скорость течения воды 0,995 м/с. Средняя температура воды  $40^\circ\text{C}$ , а стенки трубы  $100^\circ\text{C}$ . Теплофизические свойства воды при  $40^\circ\text{C}$ :  $\lambda_{\text{ж}}=0,634$  Вт/(м·К),  $\nu_{\text{ж}}=0,659 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $\text{Pr}_{\text{ж}}=4,3$ ; при  $100^\circ\text{C}$   $\text{Pr}_{\text{ст}}=1,75$ . (Ответ:  $\alpha=6,26 \cdot 10^3$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $Q=37,8$  кВт)

8. Определить тепловой поток при свободной конвекции от вертикального трубопровода диаметром 120 мм и высотой 6 м к воздуху. Температура стенки 523К, температура воздуха 293К.  $\lambda_{\text{ж}}=0,026$  Вт/(м·К),  $\nu_{\text{ж}}=1,506 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $\text{Pr}_{\text{ж}}=0,703$ . Принять, что для воздуха число Прандтля не зависит от температуры. (Ответ: 5,3 кВт)

9. Для отопления гаража используют трубу, в которой протекает горячая вода. Рассчитать коэффициент теплоотдачи и конвективный тепловой поток, если диаметр трубы 0,1 м, длина 10 м, температура стенки трубы  $85^\circ\text{C}$ , температура воздуха  $20^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_{\text{ж}}=2,59 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К),  $\nu_{\text{ж}}=15,06 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\text{Pr}_{\text{ж}}=0,7$ . (Ответ:  $\alpha=6,59$  Вт/(м<sup>2</sup>·К),  $Q=1,35$  кВт)

10. Определить количество теплоты, передаваемой конвекцией в воздушной прослойке толщиной 20 мм, если  $t_{c1}=120^\circ\text{C}$ ,  $t_{c2}=-40^\circ\text{C}$ . (Ответ:  $q=7 \cdot 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>)

### Занятие 7

Тема: Теплообмен излучением. Теплопередача (передача теплоты через стенки)

#### Вопросы

Тепловое излучение. Лучистый поток и плотность лучистого потока. Энергетическая светимость. Коэффициенты отражения, поглощения и пропускания. Закон Стефана-Больцмана. Закон Кирхгофа и следствия из него. Излучение реальных тел. Степень черноты. Серое тело. Теплообмен излучением между параллельными поверхностями в прозрачной среде. Теплообмен в случае охватывания одной поверхностью другой поверхности. Экраны для защиты от излучения. Теплопередача. Стационарная теплопередача между двумя жидкостями через разделяющую их стенку. Уравнение и коэффициент теплопередачи. Теплопередача через многослойную плоскую стенку. Теплопередача через цилиндрическую стенку. Пути интенсификации теплопередачи.

1. Определить энергетическую светимость и лучистый поток от Солнца, если температура поверхности Солнца  $5700^{\circ}\text{C}$  и условия излучения близки к излучению абсолютно черного тела. Диаметр Солнца принять равным  $1,391 \cdot 10^9$  м. (Ответ:  $72,2 \text{ МВт/м}^2$ ,  $4,39 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ )

2. Искусственный спутник облетает Землю, находясь на ее дневной стороне. Спутник имеет форму шара. Коэффициент поглощения поверхности спутника  $A$ , а ее степень черноты  $\varepsilon$ . Определить температуру поверхности спутника, не учитывая тепловой поток от Земли и считая температуру поверхности всюду одинаковой. Рассмотреть случай, если спутник является серым телом. Расстояние от Солнца до Земли принять  $150 \cdot 10^9$  м. (Ответ:  $288 \sqrt{\frac{A}{\varepsilon}} \text{ К}$ )

3. Определить, какую долю излучения от абсолютно черного источника будет отражать поверхность полированного алюминия при температуре  $250^{\circ}\text{C}$ , если известно, что при этой температуре энергетическая светимость поверхности  $170 \text{ Вт/м}^2$ . (Ответ: 0,96)

4. Определить тепловой поток, отводимый излучением с  $1 \text{ м}^2$  кирпичной стены к параллельной ей стенке, покрытой гладкой окисленной сталью. Температура стены  $215^{\circ}\text{C}$ , стали  $-25^{\circ}\text{C}$ . Степень черноты кирпича 0,9; окисленной стали – 0,78. (Ответ: 2 кВт)

5. Определить потерю теплоты путем излучения с поверхности стальной трубы диаметром 7 см и длиной 10 м при температуре поверхности  $227^{\circ}\text{C}$ , если эта труба находится в кирпичном канале квадратного сечения со стороной 0,3 м при температуре стенок  $27^{\circ}\text{C}$ . Степень черноты кирпича 0,93; окисленной стали – 0,79. (Ответ: 5,32 кВт)

6. Рассчитать тепловой поток излучением от стальных окисленных труб наружным диаметром 0,1 м, общей длиной 10 м, используемых для отопления гаража с температурой стен  $15^{\circ}\text{C}$ . Температура стенки трубы  $85^{\circ}\text{C}$ . (Ответ: 1,33 кВт)

7. Сколько экранных алюминиевых полированных пластин следует поставить в системе вакуумно-многослойной изоляции сушильного шкафа для уменьшения теплового потока излучения не менее чем на 99,4 %? Сушильный шкаф работает при температуре, до  $200^{\circ}\text{C}$ . (Ответ: 4)

8. Рассчитать теплопотери через стену здания размером  $2,5 \cdot 4$  м, если известно  $t_1=20^{\circ}\text{C}$ ,  $t_2=-20^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha_1=10 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ ,  $\alpha_2=30 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ . Стена сделана из кирпича  $\lambda=0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  толщиной 0,5 м (Ответ: 353 Вт)

9. Стена туннельной печи состоит из трех слоев кирпича – шамотного ( $\delta_1=23 \text{ см}$ ,  $\lambda_1=1,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), изоляционного ( $\delta_2=23 \text{ см}$ ,  $\lambda_2=0,28 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), и красного ( $\delta_3=25 \text{ см}$ ,  $\lambda_3=0,56 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ). Температура газов внутри печи  $1000^{\circ}\text{C}$ , температура наружной среды  $30^{\circ}\text{C}$ . Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1=14 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ ,  $\alpha_2=8 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . Определить потерю тепла через квадратный метр стены и температуры на поверхностях раздела слоев. (Ответ: 580 Вт,  $837^{\circ}\text{C}$ ,  $361^{\circ}\text{C}$ )

10. Вычислить тепловой поток через  $1 \text{ м}^2$  чистой поверхности нагрева парового котла и температуры на поверхностях стенки, если температура дымовых газов  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , кипящей воды  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент теплоотдачи от газов к стенке  $100 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$  и от стенки к кипящей воде  $5000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Коэффициент теплопроводности материала стенки  $50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Толщина стенки  $12 \text{ мм}$ . (Ответ:  $76,6 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ,  $234 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $215 \text{ }^\circ\text{C}$ )

11. Решить предыдущую задачу при условии, что в процессе эксплуатации поверхность нагрева парового котла со стороны дымовых газов покрылась слоем сажи толщиной  $1 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $0,08 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , и со стороны воды слоем накипи толщиной  $2 \text{ мм}$  с коэффициентом теплопроводности  $0,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . (Ответ:  $31,4 \text{ кВт}/\text{м}^2$ ,  $t_{c1}=685,5^\circ\text{C}$ ,  $t_{c4}=206 \text{ }^\circ\text{C}$ )

12. Стальной паропровод диаметром  $d_1/d_2=180/200 \text{ мм}$  с  $\lambda_1=50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  покрыт слоем жароупорной изоляции толщиной  $50 \text{ мм}$ ,  $\lambda_2=0,18 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Сверху изоляции лежит слой пробки толщиной  $50 \text{ мм}$ ,  $\lambda_3=0,06 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура протекающего внутри трубы пара  $427^\circ\text{C}$ , температура наружного воздуха  $27^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи от пара к трубе  $200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ , от поверхности пробки к воздуху  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Определить потери тепла на  $1 \text{ м}$  трубопровода. (Ответ:  $330,5 \text{ Вт}$ )

13. Определить, во сколько раз оребрение стенки позволит увеличить теплопередачу от горячей воды к воздуху, если коэффициент оребрения  $K_{op}=15$ , толщина стенки  $9 \text{ мм}$ , коэффициент теплопроводности  $45 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1=830 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ,  $\alpha_2=11 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . (Ответ:  $12,4$ )

### Занятие 8

Тема: Тепловой расчет теплообменных аппаратов.

#### Вопросы

Типы теплообменных аппаратов. Основы теплового расчета теплообменных аппаратов. Уравнение теплового баланса в общем (через энтальпии) и частном (через температуры) виде. Уравнение теплопередачи для теплообменника. Схемы движения теплоносителей в рекуперативных теплообменниках. Среднеарифметический температурный напор в теплообменном аппарате. Сравнение схем движения теплоносителей. Виды теплового расчета теплообменных аппаратов.

1. Масло поступает в маслоохладитель с температурой  $70^\circ\text{C}$  и охлаждается до  $30^\circ\text{C}$ . Температура охлаждающей воды на входе  $20^\circ\text{C}$ . Определить температуру воды на выходе из маслоохладителя, если расходы масла и воды равны соответственно  $10^4 \text{ кг}/\text{ч}$  и  $2,04\cdot 10^4 \text{ кг}/\text{ч}$ . Принять удельную теплоемкость масла при  $50^\circ\text{C}$   $2,135 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . (Ответ:  $30^\circ\text{C}$ )



2. В воздухоподогревателе воздух нагревается от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $210^{\circ}\text{C}$ , а горячие газы охлаждаются от  $410^{\circ}\text{C}$  до  $250^{\circ}\text{C}$ . Определить средний логарифмический температурный напор между воздухом и газом для случаев движения по прямоточной и противоточной схемам. (Ответ:  $154^{\circ}\text{C}$ ;  $215^{\circ}\text{C}$ )

3. В трубчатом пароводяном теплообменнике сухой насыщенный водяной пар с давлением  $3,5 \cdot 10^5$  Па конденсируется на внешней поверхности труб. Вода, движущаяся по трубам, нагревается от  $20^{\circ}\text{C}$  до  $90^{\circ}\text{C}$ . Определить среднелогарифмический температурный напор в этом теплообменнике и расход пара, считая, что расход воды 8 т/ч. Считать, что переохлаждение конденсата отсутствует (Ответ:  $78,8^{\circ}\text{C}$ ; 1,09 т/ч)

4. Определить поверхность нагрева водяного экономайзера, в котором теплоносители движутся по противоточной схеме, если известны следующие величины: температура газов на входе  $420^{\circ}\text{C}$ , расход газов 220 т/ч, средняя теплоемкость газов  $1,045$  кДж/(кг·К), температура воды на входе  $105^{\circ}\text{C}$ , расход воды 120 т/ч, количество передаваемой теплоты 13,5 МВт, коэффициент теплопередачи от газов к воде  $79$  Вт/( $\text{m}^2\text{K}$ ). Рассмотреть случай прямоточной схемы. (Ответ:  $1,1 \cdot 10^3$   $\text{m}^2$ ;  $1,9 \cdot 10^3$   $\text{m}^2$ )

5. Определить поверхность нагрева и число секций водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе». Греющая вода движется по внутренней стальной трубе  $\lambda_1=45$  Вт/(м·К), диаметром 35/32 мм и имеет температуру на входе  $95^{\circ}\text{C}$ , расход греющей воды 2130 кг/ч. Подогреваемая вода движется по кольцевому каналу между трубами и нагревается от  $15^{\circ}\text{C}$  до  $45^{\circ}\text{C}$ . Внутренний диаметр внешней трубы 48 мм. Расход нагреваемой воды 3200 кг/ч. Длина одной секции теплообменника 1,75 м. Потери тепла через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь. (Ответ:  $1,23$   $\text{m}^2$ ; 7)

6. В противоточный водо-водяной теплообменник имеющий площадь поверхности нагрева  $2$   $\text{m}^2$  греющая вода поступает с температурой  $85^{\circ}\text{C}$ , ее расход 2000 кг/ч. Расход нагреваемой воды 1500 кг/ч и ее температура на входе в теплообменник  $25^{\circ}\text{C}$ . Определить количество передаваемой теплоты и конечные температуры теплоносителей, если коэффициент теплопередачи  $1400$  Вт/( $\text{m}^2\text{K}$ ). (Ответ: 70 кВт;  $55^{\circ}\text{C}$ ;  $65^{\circ}\text{C}$ )

## ЛИТЕРАТУРА

1. [Баскаков, А.П. Теплотехника / А.П. Баскаков, В.В. Берг, О.К. Витт и др.; – Изд. 2-е, перераб. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.](#)
2. [Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача / В.В. Нащокин. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1975. – 496 с.](#)
3. [Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике / О.М. Рабинович. – М. : Машиностроение, 1973. – 344 с.](#)
4. [Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М. : Энергия, 1977. – 344 с.](#)
5. [Краснощеков, Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М : Энергия, 1975. – 288 с.](#)
6. [Андрианова, Т.Н. Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. Андрианова, Б.В. Дзампов, В.Н. Зубарев, С.А. Ремизов. М. : Энергия, 1964. – 200 с.](#)
7. [Жуховицкий Д.Л. Сборник задач по технической термодинамике / Д.Л. Жуховицкий. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 98 с.](#)
8. [Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 79 с.](#)

Таблица 1

Средняя теплоемкость газов в пределах от 0 до 1500°С (линейная зависимость)

Газ	Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)	Объемная теплоемкость кДж/(м <sup>3</sup> ·К)
Воз- дух	$c_{vm} = 0,7088 + 9,3 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{vm} = 0,9157 + 1,2 \cdot 10^{-4}t$
	$c_{pm} = 0,9956 + 9,3 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{pm} = 1,287 + 1,2 \cdot 10^{-4}t$
H <sub>2</sub>	$c_{vm} = 10,12 + 5,945 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{vm} = 0,9094 + 5,23 \cdot 10^{-5}t$
	$c_{pm} = 14,33 + 5,945 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{pm} = 1,28 + 5,23 \cdot 10^{-5}t$
N <sub>2</sub>	$c_{vm} = 0,7304 + 8,955 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{vm} = 0,9131 + 1,107 \cdot 10^{-4}t$
	$c_{pm} = 1,032 + 8,955 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{pm} = 1,306 + 1,107 \cdot 10^{-4}t$
O <sub>2</sub>	$c_{vm} = 0,6594 + 1,065 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{vm} = 0,943 + 1,577 \cdot 10^{-4}t$
	$c_{pm} = 0,919 + 1,065 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{pm} = 1,313 + 1,577 \cdot 10^{-4}t$
CO	$c_{vm} = 0,7331 + 9,681 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{vm} = 0,9173 + 1,21 \cdot 10^{-4}t$
	$c_{pm} = 1,035 + 9,681 \cdot 10^{-5}t$	$c'_{pm} = 1,291 + 1,21 \cdot 10^{-4}t$
H <sub>2</sub> O	$c_{vm} = 1,372 + 3,111 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{vm} = 1,102 + 2,498 \cdot 10^{-4}t$
	$c_{pm} = 1,833 + 3,111 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{pm} = 1,473 + 2,498 \cdot 10^{-4}t$
O <sub>2</sub>	$c_{vm} = 0,6837 + 2,406 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{vm} = 1,3423 + 4,723 \cdot 10^{-4}t$
	$c_{pm} = 0,8725 + 2,406 \cdot 10^{-4}t$	$c'_{pm} = 1,7132 + 4,723 \cdot 10^{-4}t$

Таблица 2

Средняя теплоемкость кислорода

Температура t, °С	Мольная теплоемкость, Дж/(моль·К)		Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_{vm}$	$\mu c_{pm}$	$c_{vm}$	$c_{pm}$	$c'_{vm}$	$c'_{pm}$
0	20,959	29,274	0,6548	0,9148	0,9349	1,3059
100	21,223	29,538	0,6632	0,9232	0,9466	1,3176
200	21,616	29,931	0,6753	0,9353	0,9642	1,3352
300	22,085	30,400	0,6900	0,9500	0,9852	1,3561
400	22,563	30,878	0,7051	0,9651	1,0065	1,3775
500	23,019	31,334	0,7193	0,9793	1,0270	1,3980
600	23,446	31,761	0,7327	0,9927	1,0459	1,4168
700	23,835	32,150	0,7448	1,0048	1,0634	1,4344
800	24,187	32,502	0,7557	1,0157	1,0789	1,4499
900	24,510	32,825	0,7658	1,0258	1,0936	1,4645
1000	24,803	33,118	0,7750	1,0350	1,1066	1,4775

Таблица 3

Средняя теплоемкость азота

Температура t, °C	Мольная теплоемкость, Дж/(моль·К)		Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_{vm}$	$\mu c_{pm}$	$c_{vm}$	$c_{pm}$	$c'_{vm}$	$c'_{pm}$
0	20,800	29,115	0,7423	1,0392	0,9278	1,2987
100	20,829	29,144	0,7427	1,0404	0,9295	1,3004
200	20,913	29,228	0,7465	1,0434	0,9328	1,3038
300	21,068	29,383	0,7519	1,0488	0,9399	1,3109
400	21,286	29,601	0,7599	1,0567	0,9496	1,3205
500	21,549	29,864	0,7691	1,0660	0,9613	1,3322
600	21,834	30,149	0,7792	1,0760	0,9743	1,3452
700	22,136	30,451	0,7900	1,0869	0,9877	1,3586
800	22,433	30,748	0,8005	1,0974	1,0006	1,3716
900	22,722	31,037	0,8110	1,1078	1,0136	1,3845
1000	22,998	31,313	0,8210	1,1179	1,0178	1,3971

Таблица 4

Средняя теплоемкость воздуха

Температура t, °C	Мольная теплоемкость, Дж/(моль·К)		Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_{vm}$	$\mu c_{pm}$	$c_{vm}$	$c_{pm}$	$c'_{vm}$	$c'_{pm}$
0	20,758	29,073	0,7164	1,0036	0,9261	1,2971
100	20,838	29,152	0,7193	1,0061	0,9295	1,3004
200	20,984	29,299	0,7243	1,0115	0,9362	1,3071
300	21,206	29,521	0,7319	1,0191	0,9462	1,3172
400	21,474	29,789	0,7415	1,0283	0,9579	1,3289
500	21,780	30,095	0,7519	1,0387	0,9718	1,3427
600	22,090	30,405	0,7624	1,0496	0,9856	1,3565
700	22,408	30,723	0,7733	1,0605	0,9998	1,3708
800	22,713	31,028	0,7842	1,0710	1,0312	1,3842
900	23,006	31,321	0,7942	1,0815	1,0262	1,3976
1000	23,283	31,598	0,8039	1,0907	1,0387	1,4097