

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

---

**ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

**Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей**

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

**Методические указания  
к выполнению контрольных работ  
для обучающихся Института безотрывных форм обучения**

**Санкт-Петербург  
2019**

УДК 621.1 (07)  
ББК 6П2.2  
Т - 382

Техническая термодинамика: методические указания к выполнению контрольных работ для обучающихся Института безотрывных форм обучения/ сост. С.В. Горбай, М.С. Липатов; ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2019. - 52 с.

В настоящих методических указаниях приводятся теоретические материалы и рекомендации по выполнению контрольных работ, представлены исходные данные, согласно шифру обучающегося.

Предназначены для обучающихся ИБФО направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

Рецензент: зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. техн. наук, доцент С.Н. Смородин.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 7 от 25.04.2019).

Утверждены к изданию методической комиссией Института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 9 от 05.06.2019).

© Горбай С.В., Липатов М.С., 2019  
© Высшая школа технологии и энергетики  
СПбГУПТД, 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| Введение.....                    | 4  |
| Общие методические указания..... | 6  |
| Исходные данные.....             | 8  |
| Контрольная работа № 1.....      | 11 |
| • Практические задания .....     | 11 |
| • Контрольные вопросы .....      | 19 |
| Контрольная работа № 2.....      | 26 |
| • Практические задания .....     | 29 |
| • Контрольные вопросы .....      | 40 |
| Библиографический список.....    | 47 |
| Приложения.....                  | 48 |

## ВВЕДЕНИЕ

Термодинамика имеет большое общеобразовательное значение для обучающихся по техническим направлениям подготовки, без неё немислима их практическая работа, а также работа в области дальнейшего совершенствования различных теплотехнических установок.

Термодинамика базируется на таких дисциплинах, как физика, математика, гидрогазомеханика и др. Она является фундаментом, определяющим развитие тепловой теории специальных дисциплин (теплоэнергетические установки, холодильные машины, двигатели внутреннего сгорания, реактивные двигатели и др.).

Термодинамика – наука, в которой исследуются физические, химические и другие процессы, сопровождающиеся переходом энергии от одних тел другим, а также рассматриваются условия перехода энергии из одного вида в другой. Являясь сравнительно молодой наукой (как самостоятельная дисциплина термодинамика оформилась вначале второй половины XIX в.), термодинамика быстро развивалась, и если вначале она была призвана обеспечить исследование достаточно узкого круга вопросов, связанных с тепловыми двигателями, то теперь вышла далеко за пределы этого круга, и её законы стали эффективно применяться во многих других областях науки и техники.

В зависимости от областей применения термодинамику принято условно разделять на следующие дисциплины: физическую термодинамику, предметом изучения которой являются превращения энергии в твёрдых, жидких и газообразных телах при осуществлении в них электрических и магнитных процессов; химическую термодинамику, изучающую превращения энергии в химических и физико-химических процессах; техническую термодинамику, исследующую превращения энергии в тепловых машинах, теплосиловых и холодильных установках. Условность такого деления заключается в том, что в основе всех этих дисциплин лежат

одни и те же законы термодинамики, записанные в различной, соответствующей данной области, форме. Кроме того, во многих технических проблемах нельзя ограничиться средствами только одной из указанных дисциплин. Исследуя, например, превращение энергии в тепловых машинах, нельзя не учитывать процессы горения, изучению которых отводится должное место в химической термодинамике.

При наличии большого количества преобразователей тепловой энергии в другие виды энергии (паровая и газовая турбины, поршневые и реактивные двигатели, атомные установки и др.) одним из важнейших вопросов термодинамики является вопрос об исследовании свойств рабочих тел, применяемых в тепловых машинах. Достаточно чёткое понимание свойств рабочих тел невозможно без привлечения молекулярной и статистической физики, рассматривающих само строение конкретных видов материи.

По мере развития техники расширяется круг вопросов, рассматриваемых в термодинамике. Развитие физики обеспечивает более глубокий анализ этих вопросов.

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Усвоение курса технической термодинамики не может быть достаточно глубоким без понимания физической сущности изучаемых явлений и процессов. Поэтому при любом методе изучения необходимо видеть физическую сторону исследуемого процесса.

Аналитические зависимости дают возможность обобщить результаты отдельных исследований, однако выводы этих зависимостей, как правило, ограничены определёнными допущениями или предположениями. Поэтому нужно ясно представлять себе, в каких случаях можно использовать формулу и какова при этом будет точность расчёта. Например, уравнение состояния идеального газа  $pv = RT$  применяется для многих газов ( $N_2, O_2, CO, H_2$ ), находящихся в условиях, когда можно пренебречь силами взаимодействия и объёмом молекул газа (например, при давлении и температуре, близких к атмосферным). При больших показателях давления и малых температурах уравнение  $pv = RT$  неприменимо для этих газов.

Курс технической термодинамики рекомендуется изучать последовательно, по темам, придерживаясь следующего порядка.

1. Приступая к изучению очередной темы, ознакомиться с содержанием её и рекомендациями, изложенными в методических указаниях к ней.

2. Прочитать по учебнику материал, относящийся к теме, не останавливаясь на выводах отдельных аналитических зависимостей. В результате такого беглого просмотра материала изучающему должно стать ясно, что является главным в теме, с чего начинаются исследования и чем заканчивается тема. Если основные идеи, заложенные в излагаемом материале, недостаточно понятны студенту, целесообразно обратиться к дополнительной литературе, рекомендованной в методических указаниях.

3. Усвоив суть темы, следует подойти к детальному изучению её. При этом необходимо:

а) запомнить точные формулировки законов (если они встречаются в изучаемой теме), основные понятия и определения, которые обычно предшествуют выводу той или иной аналитической зависимости; разобраться в ходе математических выводов, а затем самостоятельно, не заглядывая в учебник, проделать вывод соответствующей формулы или аналитического выражения;

б) при разборе математических выводов уделять особое внимание физическому смыслу этих выводов и получаемым результатам;

в) при изучении теоретического материала, и особенно при решении задач, обращать внимание на размерность встречающихся величин, так как нередко она отражает физический смысл этих величин;

г) решить задачи и ответить на вопросы изучаемой темы;

д) переходить к изучению следующей темы только после полного усвоения предыдущей темы, т. е. после того как даны ответы на все вопросы для самопроверки и решены задачи.

Одним из обязательных элементов курса является выполнение практических занятий, которые включают в себя упражнения (решение примеров и задач) и лабораторные работы. Целью их является более глубокое усвоение теоретического материала и приобретение практических навыков в проведении экспериментов.

Требования, предъявляемые на экзамене по технической термодинамике, – знание теории и понимание физической сущности рассматриваемых в термодинамике процессов, а также умение применить основные теоретические положения курса к решению практических задач.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

По первой части курса выполняется контрольная работа № 1, а по второй – № 2.

Решать задачи и отвечать на вопросы необходимо, строго придерживаясь своего варианта, номер которого определяется по таблицам (см. табл.1 и 2) в зависимости от двух последних цифр учебного шифра студента. Например, при шифре 63166 (последние две цифры - 66) студент решает 66-й вариант задания, для которого в таблице соответственно указаны номера задач : 1, 24, 49, 68. При этом в первой части курса нужно решить три задачи (первые три номера в данном примере – 1, 24, 49) и три вопроса (11,25,51). Во второй части курса нужно решить четыре задачи и ответить на четыре вопроса. Условия задачи и формулировки контрольных вопросов в контрольной работе переписываются полностью. Решения задач должны сопровождаться краткими объяснениями и подробными вычислениями. При вычислении какой-либо величины нужно словами указать, какая величина вычисляется.

В процессе решения задач необходимо сначала привести формулы, лежащие в основе вычислений, проделать с ними все выкладки (в буквенном выражении) и лишь затем подставлять соответствующие числовые значения и производить вычисления. Нужно указывать размерности величин, как заданных в условии задач, так и полученных в результате их решения.

Ответы на контрольные вопросы должны быть исчерпывающими, хоть и не пространными. Лаконичные ответы, так же как и ответы, списанные с учебника, не допускаются. При решении задач и ответах на вопросы следует придерживаться принятой в учебнике системы обозначений, терминов и Международной системы единиц (СИ).

Контрольные работы выполняются в тетради. Для заметок рецензента оставляются поля и в конце работы несколько чистых страниц.

Таблица 1

## Варианты для выбора практических задач

| Номера вариантов (две последние цифры шифра) | Номера задач в задании | Номера вариантов (две последние цифры шифра) | Номера задач в задании | Номера вариантов (две последние цифры шифра) | Номера задач в задании |
|--|------------------------|--|------------------------|--|------------------------|
| 01   | 10, 17, 42, 51         | 34   | 10, 27, 34, 55         | 67   | 1, 17, 34, 66          |
| 02   | 9, 20, 49, 52          | 35   | 9, 28, 35, 53          | 68   | 2, 26, 35, 65          |
| 03   | 8, 19, 48, 53          | 36   | 8, 29, 36, 52          | 69   | 13, 25, 46, 64         |
| 04   | 7, 18, 47, 54          | 37   | 7, 30, 37, 54          | 70   | 4, 18, 37, 63          |
| 05   | 6, 21, 46, 55          | 38   | 6, 31, 50, 61          | 71   | 5, 25, 38, 62          |
| 06   | 5, 22, 45, 56          | 39   | 5, 32, 39, 57          | 72   | 6, 24, 39, 61          |
| 07   | 4, 23, 44, 57          | 40   | 4, 24, 40, 56          | 73   | 7, 23, 40, 60          |
| 08   | 3, 24, 43, 58          | 41   | 14, 29, 41, 58         | 74   | 14, 22, 41, 59         |
| 09   | 2, 25, 42, 59          | 42   | 3, 28, 42, 60          | 75   | 3, 21, 42, 58          |
| 10   | 1, 26, 41, 60          | 43   | 2, 22, 44, 61          | 76   | 2, 20, 43, 57          |
| 11   | 16, 33, 41, 70         | 44   | 1, 20, 43, 62          | 77   | 1, 30, 44, 56          |
| 12   | 15, 22, 39, 69         | 45   | 10, 17, 46, 63         | 78   | 10, 29, 45, 55         |
| 13   | 14, 31, 48, 68         | 46   | 9, 18, 45, 64          | 79   | 9, 28, 46, 54          |
| 14   | 13, 21, 37, 67         | 47   | 8, 19, 48, 65          | 80   | 8, 27, 47, 53          |
| 15   | 12, 29, 36, 66         | 48   | 7, 20, 47, 66          | 81   | 16, 30, 48, 51         |
| 16   | 11, 28, 35, 65         | 49   | 16, 21, 49, 59         | 82   | 7, 31, 49, 52          |
| 17   | 5, 27, 34, 64          | 50   | 5, 20, 50, 67          | 83   | 6, 32, 50, 53          |
| 18   | 4, 26, 50, 63          | 51   | 15, 23, 34, 68         | 84   | 15, 33, 49, 54         |
| 19   | 3, 17, 50, 62          | 52   | 4, 31, 50, 69          | 85   | 14, 23, 48, 55         |
| 20   | 2, 18, 48, 61          | 53   | 13, 29, 36, 70         | 86   | 13, 22, 47, 56         |
| 21   | 1, 19, 47, 51          | 54   | 2, 28, 37, 69          | 87   | 12, 21, 46, 57         |
| 22   | 6, 20, 45, 52          | 55   | 1, 27, 38, 58          | 88   | 11, 30, 45, 58         |
| 23   | 7, 19, 44, 53          | 56   | 10, 26, 39, 57         | 89   | 10, 29, 44, 59         |
| 24   | 8, 22, 43, 54          | 57   | 9, 25, 40, 56          | 90   | 9, 33, 43, 60          |
| 25   | 9, 23, 42, 55          | 58   | 8, 24, 41, 66          | 91   | 5, 29, 42, 61          |
| 26   | 10, 24, 41, 56         | 59   | 7, 23, 42, 55          | 92   | 8, 28, 41, 62          |
| 27   | 16, 25, 46, 57         | 60   | 6, 22, 43, 54          | 93   | 7, 27, 40, 63          |
| 28   | 15, 23, 40, 58         | 61   | 16, 23, 44, 53         | 94   | 6, 26, 39, 64          |
| 29   | 14, 32, 49, 59         | 62   | 5, 17, 45, 52          | 95   | 15, 25, 38, 65         |
| 30   | 13, 22, 41, 60         | 63   | 4, 18, 46, 54          | 96   | 4, 24, 37, 66          |
| 31   | 12, 30, 47, 61         | 64   | 13, 20, 47, 51         | 97   | 3, 23, 36, 67          |
| 32   | 11, 29, 46, 62         | 65   | 2, 19, 48, 59          | 98   | 2, 22, 35, 68          |
| 33   | 1, 28, 45, 63          | 66   | 1, 24, 49, 68          | 99   | 1, 21, 34, 69          |
|  |                        |  |                        | 00   | 10, 20, 50, 70         |

## Варианты для выбора контрольных вопросов

| Номера вариантов (две последние цифры шифра) | Номера вопросов в задании | Номера вариантов (две последние цифры шифра) | Номера вопросов в задании | Номера вариантов (две последние цифры шифра) | Номера вопросов в задании |
|--|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| 01   | 10, 25, 42, 65            | 34   | 16, 35, 40, 62            | 67   | 12, 24, 50, 66            |
| 02   | 9, 24, 41, 64             | 35   | 3, 26, 39, 61             | 68   | 13, 23, 49, 63            |
| 03   | 8, 23, 40, 63             | 36   | 15, 25, 38, 60            | 69   | 14, 22, 48, 65            |
| 04   | 7, 22, 39, 62             | 37   | 14, 24, 37, 59            | 70   | 15, 21, 47, 64            |
| 05   | 6, 21, 38, 61             | 38   | 4, 23, 36, 58             | 71   | 16, 20, 46, 57            |
| 06   | 5, 20, 37, 60             | 39   | 6, 22, 46, 57             | 72   | 17, 19, 45, 70            |
| 07   | 4, 19, 36, 59             | 40   | 7, 21, 47, 67             | 73   | 18, 34, 44, 58            |
| 08   | 3, 35, 56, 58             | 41   | 9, 20, 48, 68             | 74   | 10, 35, 43, 59            |
| 09   | 2, 34, 55, 57             | 42   | 8, 19, 49, 69             | 75   | 9, 27, 42, 60             |
| 10   | 1, 33, 54, 70             | 43   | 12, 33, 50, 70            | 76   | 8, 28, 41, 61             |
| 11   | 16, 33, 53, 69            | 44   | 11, 32, 51, 59            | 77   | 7, 29, 40, 62             |
| 12   | 15, 32, 52, 68            | 45   | 13, 31, 52, 60            | 78   | 6, 30, 39, 63             |
| 13   | 14, 31, 51, 67            | 46   | 15, 30, 53, 61            | 79   | 5, 31, 38, 64             |
| 14   | 13, 30, 50, 66            | 47   | 17, 29, 52, 62            | 80   | 4, 32, 37, 65             |
| 15   | 12, 29, 49, 65            | 48   | 18, 28, 53, 63            | 81   | 3, 33, 36, 66             |
| 16   | 11, 28, 48, 57            | 49   | 14, 27, 54, 64            | 82   | 2, 34, 56, 67             |
| 17   | 5, 27, 47, 58             | 50   | 1, 26, 55, 65             | 83   | 1, 35, 39, 68             |
| 18   | 4, 26, 46, 59             | 51   | 5, 25, 56, 66             | 84   | 11, 26, 56, 69            |
| 19   | 3, 25, 45, 60             | 52   | 9, 24, 45, 67             | 85   | 12, 25, 51, 70            |
| 20   | 2, 24, 44, 61             | 53   | 13, 23, 44, 68            | 86   | 13, 24, 45, 57            |
| 21   | 1, 23, 43, 62             | 54   | 17, 22, 43, 69            | 87   | 14, 23, 47, 59            |
| 22   | 6, 22, 42, 63             | 55   | 6, 21, 42, 70             | 88   | 15, 22, 44, 61            |
| 23   | 7, 21, 41, 64             | 56   | 7, 20, 41, 58             | 89   | 16, 21, 37, 63            |
| 24   | 8, 20, 40, 65             | 57   | 2, 19, 40, 57             | 90   | 17, 20, 54, 65            |
| 25   | 9, 19, 39, 66             | 58   | 3, 33, 39, 58             | 91   | 18, 19, 52, 67            |
| 26   | 10, 27, 38, 67            | 59   | 4, 32, 38, 70             | 92   | 5, 35, 50, 69             |
| 27   | 18, 28, 37, 68            | 60   | 5, 31, 37, 59             | 93   | 9, 25, 41, 70             |
| 28   | 15, 29, 36, 69            | 61   | 6, 30, 36, 69             | 94   | 8, 20, 49, 68             |
| 29   | 17, 30, 45, 70            | 62   | 7, 29, 55, 60             | 95   | 7, 34, 46, 66             |
| 30   | 13, 31, 44, 66            | 63   | 8, 28, 54, 68             | 96   | 4, 21, 38, 64             |
| 31   | 10, 32, 43, 65            | 64   | 9, 27, 53, 61             | 97   | 2, 23, 39, 62             |
| 32   | 11, 33, 42, 64            | 65   | 10, 26, 52, 67            | 98   | 15, 33, 40, 60            |
| 33   | 2, 34, 41, 63             | 66   | 11, 25, 51, 62            | 99   | 18, 28, 53, 58            |
|  |                           |  |                           | 00   | 10, 20, 50, 70            |

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

Первые 10 задач посвящены параметрам и уравнению состояния идеального газа. Следует твёрдо усвоить размерности встречающихся в задачах величин, уметь переводить их из одной системы единиц в другую, а также решать задачи, связанные с уравнением состояния. Задачи 11-20 помогают практическими расчётами закрепить теоретический материал по смесям идеальных газов.

В задачах 21-30 рассматриваются изохорный и изобарный процессы идеального газа. Решая эти задачи, необходимо учитывать зависимость теплоёмкости идеальных газов от температуры и определять её, пользуясь таблицами приложения. Задачи 31-40 посвящены изотермическому и адиабатному процессам, а 41-50- политропному.

### ***ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ:***

1. Компрессор подаёт сжатый воздух в резервуар, при этом давление в резервуаре, измеренное манометром, повышается от  $p_1 = 0$  до  $p_2 = 0,8$  МПа, а температура – от 20 до 27 °С. Определить массу воздуха, поданного компрессором в резервуар, если объём баллона  $V = 5$  м<sup>3</sup>, а барометрическое давление  $B = 750$  мм.рт.ст. (Задачу решить в единицах СИ).

2. Насколько больше в баллон, объём которого  $V = 40$  л, вмещается кислорода, чем водорода, при температуре  $t = 15$  °С и давлении по манометру  $p = 15$  МПа, если барометрическое давление  $B = 750$  мм.рт.ст.? (Задачу решить в единицах СИ).

3. Из баллона ёмкостью  $V = 60$  л выпускается воздух в атмосферу, при этом давление воздуха, измеренное манометром, уменьшается с  $p_1 = 5$  МПа до  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить массу выпущенного воздуха, если

температура его изменилась от  $t_1 = 27\text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление  $B = 750$  мм. рт. ст. (Задачу решить в единицах СИ).

4. Баллон ёмкостью 40 л с открытым вентиляем имеет массу  $M_1 = 80$  кг. После того как компрессором в него был добавлен воздух, масса баллона увеличилась до  $M_2 = 86$  кг. Определить конечное давление воздуха в баллоне, если температура воздуха в начале и в конце процесса сохранялась постоянной, равной  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление  $B = 750$  мм. рт. ст. (Задачу решить в единицах СИ).

5. Воздушный баллон, рассчитанный на предельное абсолютное давление  $p_{\text{рао}} = 25$  МПа, заполнен воздухом с избыточным давлением  $p_1 = 14,9$  МПа. При пожаре в помещении, где находился баллон, температура воздуха в нём повысилась до  $t_2 = 500\text{ }^\circ\text{C}$ . Выдержит ли баллон возросшее давление, если известно, что температура воздуха в баллоне до пожара была  $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление  $B = 750$  мм. рт. ст. (Задачу решить в единицах СИ).

6. В цилиндре диаметром  $d = 80$  мм содержится 100 г воздуха при избыточном давлении  $p = 0,2$  МПа и температуре  $t_1 = 27\text{ }^\circ\text{C}$ . Наружное давление  $B = 750$  мм. рт. ст. До какой температуры следует нагреть воздух в цилиндре, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 60 мм при постоянном давлении в цилиндре? (Задачу решить в единицах СИ).

7. Определить подъёмную силу воздушного шара объёмом  $V = 1000\text{ м}^3$  на высоте  $H = 3$  км, если абсолютное давление водорода, заполняющего шар,  $p = 0,071$  МПа, температура водорода равна температуре окружающего воздуха  $T_{\text{н}} = 268\text{ К}$ , а плотность воздуха на этой высоте  $\rho = 0,91\text{ }\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

8. Какое количество воды можно вытеснить из цистерны подводной лодки, находящейся на глубине  $h = 40$  м, если для этого применяется сжатый воздух из баллона объёмом  $V = 40$  л при избыточном давлении

воздуха  $p_1 = 24,9$  МПа и температуре  $t_1 = 27$  °С, если барометрическое давление  $B = 750$  мм. рт. ст.? (Задачу решить в единицах СИ.)

**9.** Баллон с воздухом объёмом 40 л имеет избыточное давление  $p_1 = 13,9$  МПа при температуре  $t_1 = -23$  °С. Определить избыточное давление воздуха в баллоне  $p_2$ , после того как температура его стала  $t_2 = +27$ °С, а также количество воздуха, которое необходимо выпустить, чтобы при температуре  $t_3 = +27$ °С давление снова упало до  $p_1$ . Барометрическое давление принять  $B = 750$  мм.рт.ст. (Задачу решить в единицах СИ.)

**10.** В воздухоподогреватель котельной установки поступает  $5 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$  воздуха при температуре  $t_1 = 25$  °С и избыточном давлении 500 мм. вод. ст. Определить скорость воздуха после подогревателя, если площадь поперечного сечения воздуховода  $F = 4$  м<sup>2</sup>. Температура подогретого воздуха  $t_2 = 200$  °С. Барометрическое давление  $B = 750$  мм. рт. ст. (Задачу решить в единицах СИ.)

**11.** Определить газовую постоянную и плотность газовой смеси, а также парциальное давление отдельных компонентов, если смесь состоит из 14%  $CO_2$ , 73%  $N_2$ , 6%  $O_2$  и 7%  $H_2O$  по объёму. Абсолютное давление смеси  $p = 0,2$  МПа, а температура  $t = 300$  °С.

**12.** 1 кг воздуха состоит из 23,2 мас. ч. кислорода и 76,8 мас. ч. азота. Определить объёмный состав воздуха, среднюю молекулярную массу, газовую постоянную, а также парциальное давление кислорода и азота в мегапаскалях, если барометрическое давление  $B = 0,1$  МПа.

**13.** Определить молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и удельный объём при нормальных физических условиях, а также объёмный состав смеси, если задан её массовый состав: 7%  $N_2$ , 8%  $H_2$ , 51%  $CH_4$ , 5%  $O_2$ , 19%  $CO$  и 10%  $CO_2$ .

**14.** В 1 м<sup>3</sup> сухого воздуха содержится по объёму 21%  $O_2$  и 79%  $N_2$ . Определить массовый состав воздуха, молекулярную массу и газовую

постоянную его, а также парциальное давление кислорода и азота в мегапаскалях, если барометрическое давление  $B = 0,1$  МПа.

**15.** Продукты сгорания имеют следующий объёмный состав:  $CO_2 - 12,2\%$ ,  $O_2 - 7,1\%$ ,  $CO - 0,4\%$  и  $N_2 - 80,3\%$ . Определить массовый состав, газовую постоянную, плотность и удельный объём смеси, если абсолютное давление смеси  $p = 0,5$  МПа, а температура  $t = 27$  °С.

**16.** Смесь состоит из 7 кг водорода и 93 кг окиси углерода. Определить газовую постоянную и плотность смеси, а также парциальное давления водорода и окиси углерода, если абсолютное давление смеси  $p = 0,4$  МПа, а температура  $t = 15$  °С.

**17.** Смесь состоит из 6 кмоль азота и 4 кмоль углекислого газа. Определить газовую постоянную и плотность смеси при нормальных физических условиях, а также её массовый состав.

**18.** Смесь состоит из 18%  $H_2$ , 24%  $CO$ , 6%  $CO_2$  и 52%  $N_2$  по объёму. Определить газовую постоянную, плотность и массовый состав смеси, если абсолютное давление смеси  $p = 0,4$  МПа, а температура  $t = 35$  °С.

**19.** Генераторный газ состоит на 57%  $H_2$ , 23%  $CH_4$ , 6%  $CO_2$ , 2%  $CO$  и 12%  $N_2$  по объёму. Определить среднюю молекулярную массу, газовую постоянную, плотность смеси, а также массовые доли компонентов при  $p = 0,1$  МПа и  $t = 17$ °С.

**20.** Определить массовый и объёмный состав смеси водорода с азотом, если газовая постоянная её  $R = 922 \frac{Дж}{кг \cdot К}$ . Определить также парциальное давление компонентов, если абсолютное давление смеси  $p = 0,2$  МПа.

**21.** 2 кг азота с начальными температурой  $t_1 = 100$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,9$  МПа нагреваются при постоянном объёме до температуры  $t_2 = 500$  °С. Определить конечное давление газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**22.** 3 кг воздуха с начальными температурой  $t_1 = 12\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,9\text{ МПа}$  нагреваются при постоянном объёме до температуры  $t_2 = 375\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить конечное давление газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**23.**  $5\text{ м}^3$  кислорода с начальными температурой  $t_1 = 75\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1\text{ МПа}$  нагреваются при постоянном объёме так, что его абсолютное давление повышается до  $p_2 = 0,3\text{ МПа}$ . Определить конечную температуру газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**24.** 6 кг окиси углерода с начальными температурой  $t_1 = 240\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,5\text{ МПа}$  охлаждаются при постоянном объёме до температуры  $t_2 = 130\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить конечное давление газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

**25.**  $7\text{ м}^3$  углекислого газа с начальными температурой  $t_1 = 570\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,7\text{ МПа}$  охлаждаются при постоянном объёме так, что его абсолютное давление повышается до  $p_2 = 0,3\text{ МПа}$ . Определить конечную температуру газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

**26.** 6 кг водорода с начальной температурой  $t_1 = 0\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1\text{ МПа}$  нагреваются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 200\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить начальный и конечный объём газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**27.** 1 кг азота с начальной температурой  $t_1 = 130\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,2\text{ МПа}$  нагревается при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 350\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить начальный и конечный объём газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**28.**  $4\text{ м}^3$  кислорода с начальной температурой  $t_1 = 70\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,3\text{ МПа}$  нагреваются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 320\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить начальный и конечный объём газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**29.** 3 кг окиси углерода с начальной температурой  $t_1 = 270$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,7$  МПа охлаждаются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 120$  °С. Определить начальный и конечный объём газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

**30.** 6 м<sup>3</sup> метана с начальной температурой  $t_1 = 310$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,6$  МПа охлаждаются при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 190$  °С. Определить конечный объём газа, количество отводимого от него тепла и изменение его энтропии.

**31.** 4 кг воздуха расширяются изотермически при температуре  $t = 50$  °С так, что его объём возрастает в 3,5 раза, а давление становится равным  $p_2 = 0,1$  МПа. Определить начальный и конечный объём газа, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**32.** 3 м<sup>3</sup> метана с начальным абсолютным давлением  $p_1 = 0,2$  МПа при температуре  $t = 70$  °С расширяются изотермически до объёма 5,7 м<sup>3</sup>. Определить количество газа, участвующего в процессе, количество подводимого к нему тепла и изменение его энтропии.

**33.** 4 кг углекислого газа с начальным абсолютным давлением  $p_1 = 0,8$  МПа при температуре  $t = 50$  °С расширяются изотермически с подводом тепла в количестве 50 кДж. Определить начальный и конечный объём газа, а также изменение его энтропии.

**34.** 5 м<sup>3</sup> кислорода с начальным абсолютным давлением 0,1 МПа при температуре  $t = 20$  °С сжимаются изотермически с отводом тепла в количестве 20 кДж/кг. Определить количество газа, участвующего в процессе, а также его конечный объём и изменение его энтропии.

**35.** 6 кг окиси углерода сжимаются изотермически при температуре  $t = 60$  °С так, что его объём уменьшается в 2,3 раза, а давление становится равным  $p_2 = 0,25$  МПа. Определить начальный и конечный объём газа, количество отводимого от газа тепла и изменение его энтропии.

**36.** 2 кг азота с начальной температурой  $t_1 = 300$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,8$  МПа адиабатно расширяются с понижением давления до

$p_2 = 0,5$  МПа. Найти начальный и конечный объём газа, конечную температуру и работу расширения и изменение энтальпии газа.

**37.**  $3 \text{ м}^3$  углекислого газа с начальной температурой  $t_1 = 400$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,5$  МПа адиабатно расширяются до объёма  $5 \text{ м}^3$ . Определить конечные температуру и давление газа, работу расширения и изменение энтальпии газа.

**38.**  $2$  кг метана с начальной температурой  $t_1 = 400$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,6$  МПа адиабатно расширяются так, что внутренняя энергия его уменьшается на  $50$  кДж. Определить начальный и конечный удельный объём газа, а также конечные температуру и давление его. Найти также изменение энтальпии газа.

**39.**  $1$  кг кислорода с начальной температурой  $t_1 = 20$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1$  МПа адиабатно сжимается с повышением давления до  $p_2 = 0,4$  МПа. Определить начальный и конечный удельный объём газа, конечную температуру его, изменение внутренней энергии и изменение энтальпии газа.

**40.**  $4 \text{ м}^3$  окиси углерода с начальной температурой  $t_1 = 30$  °С и абсолютным давлением  $p_1 = 0,2$  МПа адиабатно сжимаются так, что внутренняя энергия каждого килограмма газа увеличивается на  $10$  кДж. Определить количество газа, а также конечные параметры и изменение его энтальпии.

**41.** В процессе политропного расширения  $2$  кг воздуха к нему подводится  $600$  кДж тепла. При этом внутренняя энергия его увеличилась на  $300$  кДж. Определить показатель политропы, работу расширения, а также конечные параметры воздуха, если начальная температура его  $t_1 = 30$  °С, а абсолютное давление  $p_1 = 0,5$  МПа. Изобразить процесс в  $p\nu$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**42.**  $1$  кг азота, имея начальную температуру  $t_1 = 400$  °С и абсолютное давление  $p_1 = 1,3$  МПа, в политропном процессе совершает работу  $L = 400$  кДж/кг, при этом внутренняя энергия его уменьшается на

$\Delta u = 200$  кДж/кг. Определить показатель политропы, участвующее в процессе тепло, а также конечные параметры азота. Изобразить процесс в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**43.** В процессе политропного сжатия 3 кг окиси углерода к нему подводится  $Q = 300$  кДж тепла и затрачивается работа  $L = 450$  кДж. Определить показатель политропы, изменение внутренней энергии, а также конечные параметры газа, если начальная температура его  $t_1 = 27$  °С, а абсолютное давление  $p_1 = 0,1$  МПа. Изобразить процесс в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**44.** 4 м<sup>3</sup> воздуха, имея начальную температуру  $t_1 = 60$  °С и абсолютное давление  $p_1 = 0,13$  МПа, сжимаются политропно до давления  $p_2 = 0,65$  МПа. Определить количество подведённого тепла, работу сжатия, изменение внутренней энергии и энтропии, если показатель политропы  $n = 1,3$ . Представить процесс в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**45.** 3 м<sup>3</sup> азота, имея начальную температуру  $t_1 = 47$  °С и абсолютное давление  $p_1 = 0,6$  МПа, расширяются политропно до абсолютного давления  $p_2 = 0,15$  МПа, при этом объём азота становится равным  $V_2 = 10$  м<sup>3</sup>. Определить показатель политропы, конечную температуру, работу, участвующее в процессе тепло и изменение энтропии газа. Процесс изобразить в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**46.** В процессе политропного сжатия кислорода затрачивается работа  $L = 400$  кДж, причём в одном случае от кислорода отводится 600 кДж, а в другом – кислороду сообщается 200 кДж тепла. Определить показатели обеих политроп. Процессы изобразить в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**47.** В процессе политропного расширения воздуху сообщается 120 кДж тепла. Определить изменение внутренней энергии воздуха и энтальпию его, а также произведённую работу, если объём воздуха увеличился в 40 раз, а абсолютное давление его уменьшилось в 15 раз. Изобразить процесс в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**48.** Углекислый газ с начальной температурой  $t_1 = 70\text{ }^\circ\text{C}$  и абсолютным давлением  $p_1 = 0,1\text{ МПа}$  необходимо довести до абсолютного давления  $p_2 = 0,14\text{ МПа}$  так, чтобы отношение подведённого к газу тепла к совершённой газом работе составляло 10. Считая процесс политропным, определить теплоёмкость указанного процесса и конечную температуру газа. Изобразить процесс в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

**49.** В процессе расширения кислорода были зафиксированы три равновесных состояния, для которых параметры имеют следующие значения:

1)  $p_1 = 2\text{ МПа}$ ,  $t_1 = 487\text{ }^\circ\text{C}$ ; 2)  $p_2 = 1\text{ МПа}$ ,  $v_2 = 0,213\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ; 3)  $v_3 = 0,3\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ ,  $t_3 = 576\text{ }^\circ\text{C}$ . Доказать, что этот процесс является политропным, и определить показатель политропы.

**50.** В центробежном компрессоре воздух политропно сжимается от абсолютного давления  $p_1 = 0,09\text{ МПа}$  и температуры  $t_1 = 5\text{ }^\circ\text{C}$  до давления  $p_2 = 0,44\text{ МПа}$  и температуры  $t_2 = 210\text{ }^\circ\text{C}$ . Определить величину показателя политропы сжатия, подведённое тепло (на 1 кг), изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии. Изобразить процесс в  $pv$  – и  $Ts$  – диаграммах.

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:***

**1.** Дайте определение идеального и реального газа. Какой практический интерес представляет введение понятия идеального газа?

**2.** Что собой представляет механический и электрический эквиваленты тепла, их численное значение и размерность в старых и новых единицах измерения?

**3.** Что такое рабочее тело? Почему в качестве рабочего тела используются вещества в газообразном или парообразном состоянии?

4. Что такое термодинамическая система, равновесное и неравновесное состояния, равновесный и неравновесный термодинамический процессы?

5. Что такое параметр состояния? Какие параметры приняты в технической термодинамике за основные и почему? Являются ли основные параметры независимыми?

6. Что такое уравнение состояния? Как можно графически изобразить уравнение состояния? Что такое термодинамическая поверхность?

7. Что такое теплота и как она вычисляется? Функцией чего она является?

8. Что такое работа? Функцией чего она является? Как она вычисляется?

9. Что такое внутренняя энергия? Функцией чего она является и как может быть аналитически вычислена?

10. Что такое термодинамическая диаграмма состояний? Какие диаграммы имеют наибольшее практическое применение и почему? В какой диаграмме работа изображается площадью под кривой процесса?

11. Как может быть вычислена плотность газа, входящего в состав смеси? Какими способами может быть задана смесь идеальных газов?

12. Как вычисляется парциальное давление газов, входящих в смесь, если она задана объёмными и массовыми долями?

13. Как вычисляется плотность идеальных газов, если смесь задана объёмными и массовыми долями?

14. Как, зная кажущуюся молекулярную массу смеси идеальных газов, можно вычислить их удельную газовую постоянную? Что такое кажущаяся молекулярная масса смеси газов?

15. Что такое парциальное давление газа, входящего в смесь? Как подсчитывается парциальное давление, если газовая смесь задана объёмными и массовыми долями?

16. Что такое кажущаяся (фиктивная) молекулярная масса смеси идеальных газов? Как она подсчитывается?

17. Дайте вывод выражения для определения газовой постоянной смеси идеальных газов.

18. Что такое парциальный объём газа в смеси? Чему равна сумма парциальных объёмов газов, входящих в смесь?

19. Что такое объёмный и массовый составы смеси идеальных газов и как можно перейти от одного к другому?

20. Сформулируйте закон Дальтона. Для каких газов он справедлив? Какими способами может быть задана смесь идеальных газов?

21. Почему теплоёмкость при постоянном давлении больше, чем теплоёмкость при постоянном объёме? Какова связь между этими теплоёмкостями?

22. От каких параметров зависит теплоёмкость идеального газа? Как определяется изменение энтальпии и внутренней энергии идеального газа, если известна истинная и средняя теплоёмкость при постоянном давлении и при постоянном объёме?

23. Сущность квантовой теории теплоёмкости. В чём её преимущество перед молекулярно-кинетической теорией? От чего зависит теплоёмкость идеального газа, вычисленная на основании квантовой теории теплоёмкости?

24. В чём сущность молекулярно-кинетической теории теплоёмкости? Какие значения теплоёмкости получаются по этой теории? Основные недостатки молекулярно-кинетической теории теплоёмкости.

25. Какая теплоёмкость – средняя от 0 до  $t^0$  или истинная при  $t^0$  - больше и почему? Покажите это также на частном примере, когда истинная теплоёмкость может быть описана полиномом второй степени вида:  $c = a + bt + dt^2$ .

26. Как, зная среднюю теплоёмкость от 0 до  $t^0$ , вычислить среднюю теплоёмкость в интервале температур от  $t_1$  до  $t_2$ ? Какая теплоёмкость -

от 0 до  $t_1^0$ , от 0 до  $t_2^0$  или от  $t_1$  до  $t_2$  – будет иметь наибольшее значение и почему? Проиллюстрируйте это на графике.

**27.** Какова связь между истинной и средней теплоёмкостью? Как вычисляется тепло в процессе через истинную и среднюю теплоёмкость?

**28.** Почему теплоёмкость зависит от вида процесса? Дайте значения теплоёмкости для основных процессов изменения состояния. Выведите уравнение Майера. Для какого газа оно справедливо?

**29.** Функцией чего является теплоёмкость реального и идеального газов? Что такое истинная и средняя теплоёмкость?

**30.** Что такое теплоёмкость? К каким единицам количества принято относить теплоёмкость? Связь между различными видами теплоёмкости.

**31.** Какой процесс называется изохорным? Соотношение между параметрами в изохорном процессе, вычисление тепла и работы в процессе. Чему равен показатель политропы в изохорном процессе? Как вычисляется приращение энтропии в процессе?

**32.** Какой процесс называется изобарным? Соотношение между параметрами в изобарном процессе, вычисление тепла, работы и приращения энтропии в процессе. Физический смысл удельной газовой постоянной. Чему равен показатель политропы в изобарном процессе?

**33.** Какой процесс называется изотермическим? Соотношение между параметрами в изотермическом процессе, вычисление тепла, работы и приращения энтропии в процессе. Почему в изотермическом процессе идеального газа внутренняя энергия не изменяется? Теплоёмкость и показатель политропы в изотермическом процессе.

**34.** Какой процесс называется адиабатным? Соотношение между параметрами в адиабатном процессе, вычисление тепла и работы в процессе. Чему равны показатель политропы и теплоёмкость этого процесса?

**35.** Покажите на основании аналитического выражения первого закона термодинамики  $q = \Delta u + l$ , в каких процессах сжатия и расширения температура идеального газа будет увеличиваться и в каких уменьшаться?

**36.** Дайте определение политропного процесса. Почему и в каком случае частные процессы изменения состояния (изобарный, изохорный, адиабатный и изотермический) являются процессами политропными?

**37.** Линия какого процесса – изохорного или изобарного – будет идти круче в  $Ts$  – диаграмме и почему?

**38.** Линия какого процесса – адиабатного или изотермического – будет идти круче в  $pV$  – диаграмме и почему? За счёт чего совершается работа в процессе адиабатного и изотермического расширения?

**39.** В каких пределах изменяется теплоёмкость в политропных процессах? Изобразите график изменения теплоёмкости от показателя политропы. Физическая сущность отрицательной теплоёмкости.

**40.** Покажите в  $pV$  – диаграмме области, в которых политропные процессы расширения и сжатия протекают при  $q > 0$  и  $q < 0$ ,  $\Delta u > 0$  и  $\Delta u < 0$ . Объясните, почему это так.

**41.** Выведите дифференциальное выражение, связывающее производную от энтропии по температуре с теплоёмкостью. Как графически определяются величина и знак теплоёмкости в  $Ts$  – диаграмме?

**42.** В чём сущность статистического толкования второго закона термодинамики? Физический смысл энтропии. Связь между энтропией и термодинамической вероятностью состояния.

**43.** Как изображается в  $Ts$  – диаграмме тепло процесса? Каким образом при помощи аналитического выражения второго закона можно определить знак тепла в процессе? Изобразите в  $Ts$  – диаграмме процесс с подводом тепла и обоснуйте его.

**44.** Как изменяется работоспособность изолированной системы при протекании в ней необратимых процессов? Как подсчитать это изменение работоспособности?

**45.** Как может измениться энтропия в изолированной системе при протекании в ней различных термодинамических процессов? Дайте примеры.

**46.** Почему энтропия является параметром состояния? Покажите, что для обратимых круговых процессов  $\oint \frac{dq}{T} = 0$ , а для необратимых  $\oint \frac{dq}{T} < 0$ . Напишите аналитическое выражение второго закона термодинамики.

**47.** Почему произвольным обратимым циклом, осуществляемым между двумя источниками тепла, будет регенеративный (обобщённый) цикл Карно? Чему равен термический к.п.д. этого цикла?

**48.** Покажите, что термический к.п.д. идеального обратимого цикла Карно  $\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$  не зависит от свойств рабочего тела, при помощи которого совершается цикл.

**49.** Почему при наличии двух источников тепла единственным возможным обратимым циклом является цикл Карно?

**50.** В чём сущность второго закона термодинамики? Дайте основные формулировки этого закона и покажите их общность.

**51.** Что такое приведённое уравнение состояния? Практическая важность этого уравнения. Сформулируйте закон соответственных состояний.

**52.** Опыт Эндрюса с углекислотой. Изобразите изотермы реального газа в  $pV$  – диаграмме. Дайте анализ характерных линий и областей в этой диаграмме.

**53.** Изобразите в  $pV$  – диаграмме изотермы, вычисленные по уравнению Ван-дер-Ваальса. Нанесите на эту же диаграмму верхнюю и нижнюю пограничные кривые. Дайте анализ протекания изотерм при различных температурах и сравните их с действительными изотермами.

**54.** Что такое критическое состояние вещества и чем оно интересно? Как могут быть вычислены константы  $a$  и  $b$  в уравнении Ван-дер-Ваальса через критические параметры?

**55.** Дайте элементарный вывод уравнения Ван-дер-Ваальса. Каков физический смысл величин  $a$  и  $b$  в этом уравнении?

**56.** Что собой представляет уравнение Ван-дер-Ваальса, если его выразить по убывающим степеням удельного объёма? Какие значения могут иметь корни этого уравнения для различных изотерм? Какие участки изотерм Ван-дер-Ваальса могут быть практически получены и какие из них лишены физического смысла и почему? (Анализ изотерм Ван-дер-Ваальса проведите с помощью  $p\nu$  – диаграммы.)

**57.** В чём сущность теории ассоциации реальных газов? Дайте элементарный вывод уравнения состояния реальных газов Вукаловича и Новикова.

**58.** Изобразите изотермы реального газа в  $p\nu - p$  – диаграмме. Что такое точка Бойля? Что такое линия Бойля и как аналитически может быть она вычислена? Как построить в диаграмме  $p\nu - p$  линию  $p\nu = RT$ , т.е. линию, отражающую совокупность состояний реального газа, в которых он соответствует уравнению состояния идеального газа?

**59.** Какие факторы и как влияют на изотермическую сжимаемость реального газа по сравнению с идеальным газом? Покажите, как протекают изотермы реального газа в  $p\nu - p$  – диаграмме и поясните их характер на основе предыдущего вопроса.

**60.** Что такое термические коэффициенты? Перечислите их. Какой практический интерес они представляют? Дайте вывод зависимости, связывающей термические коэффициенты между собой.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

Задачи 1-10 предназначены для практического освоения таблиц воды и водяного пара, поэтому их следует решать только при помощи этих таблиц. Наоборот, задачи 11-20 предназначены для овладения навыками пользования  $hs$  – диаграммой, поэтому их можно и нужно решать с помощью этой диаграммы. перед началом решения следует изобразить рассматриваемый процесс схематически так, чтобы на рисунке был виден ход решения задачи. Задачи 21-30 посвящены процессам во влажном воздухе. Решать их следует с помощью  $hd$  – диаграммы, причём схема решения должна быть представлена графически.

При выполнении задания следует иметь в виду, что в условиях всех задач даются абсолютные, а не избыточные давления рабочего тела и это не оговаривается особо в каждой задаче только для краткости.

При решении задач 31-40 на истечение газов расчёты следует выполнять по формулам для идеального газа. С целью упрощения расчётов зависимость показателя адиабаты от температуры учитывать не следует, а нужно определять его как отношение теплоёмкостей  $c_p/c_v$  исходя из их постоянных численных значений, вытекающих из молекулярно-кинетической теории теплоёмкости (эти значения даны в приложении). Необходимо уяснить, что такое упрощение связано с некоторой погрешностью расчёта, которая тем больше, чем шире диапазон температур, в котором происходит истечение. В более точных расчётах показатель адиабаты нужно определять как отношение средних теплоёмкостей  $c_{pm}/c_{vm}$ , причём конечная температура процесса сначала неизвестна. Поэтому в таких расчётах приходится применять метод последовательного приближения. Учитывая, что целью в данном случае является не овладение методикой определения средних теплоёмкостей по таблицам, чему было уделено достаточное внимание в первой части курса, а более глубокое знакомство с

теорией истечения, мы полагаем, что некоторая погрешность расчётов в данном случае допустима и оправдана их упрощением.

При решении задач 61-70 на дросселирование газов рабочее тело также следует считать идеальным газом с постоянной теплоёмкостью. Необходимо помнить, что равенство  $h_1 = h_2$  строго справедливо только в идеальном случае, когда газ «просачивается» через дроссельную пробку с нулевой скоростью. В реальных же процессах, когда при дросселировании происходит иногда существенное изменение скорости газа, это равенство соблюдается только приближённо. В связи с этим некоторые из указанных задач составлены так, чтобы в ходе решения студенты могли бы уяснить примерную величину погрешности, которая обусловлена идеализацией процесса дросселирования, сводящейся к тому, что изменение скорости газа в этом процессе не учитывается.

При решении задач 41-60 на истечение водяного пара прежде всего приходится решать вопрос о величине критического давления  $p_{кр}$ . Этот вопрос представляет известную трудность, поскольку в этом случае формулы, полученные для истечения идеального газа, непосредственно использованы быть не могут. Наиболее приемлемым следует считать метод последовательного приближения с применением формул идеального газа и корректировкой результатов по  $hs$  – диаграмме. Исходя из того, что если подобрать такое значение показателя адиабаты, при котором уравнение  $pv^k = const$  правильно описывает процесс адиабатного истечения водяного пара (причём этот показатель уже, конечно, не имеет смысла отношения теплоёмкостей  $c_p/c_v$ ), то для определения величины  $p_{кр}$  можно использовать формулу  $\frac{p_{кр}}{p_1} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ . Следовательно, в начале расчёта нужно задаться приближённым значением  $k$  (если перед соплом пар перегретый, то принимают  $k=1,3$ , а если сухой насыщенный или влажный, то  $k=1,135$ ). Затем, подставив это значение в указанную формулу, нужно определить предварительную величину  $p_{кр}'$  и, пользуясь  $hs$  – диаграммой, найти в

точке пересечения изобары  $p_{кр}'$  с адиабатой истечения соответствующее ей предварительное значение критического удельного объёма  $v_{кр}'$ . Эти данные дают возможность найти уточнённое значение  $k$  по формуле  $k = \lg\left(\frac{p_1}{p_{кр}}\right) / \lg\left(\frac{v_{кр}}{v_1}\right)$  и в случае несовпадения его с первоначально заданным определить соответствующие ему уточнённые значения  $p_{кр}$  и  $v_{кр}$ . Эту операцию следует повторять до тех пор, пока вычисленное значение  $k$  не даст приемлемого совпадения с заданным.

Следует помнить, что описанный метод последовательного приближения даёт достаточно хорошие результаты только при большой точности выполнения как расчётной, так и графической части работы.

Решение задач на истечение водяного пара с помощью  $hs$  – диаграммы обязательно следует иллюстрировать соответствующим схематическим графиком. Предпочтительно пользоваться  $hs$  – диаграммой, составленной в единицах СИ; при отсутствии же таковой можно пользоваться и  $hs$  – диаграммой, в которой энтальпии даны в килокалориях на килограмм, энтропии – в килокалориях на килограмм и градус и давление – в атмосферах абсолютных. В этом случае для упрощения можно приближённо принимать, что  $1 \text{ ат} = 1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа}$ , однако необходимо помнить, что такое допущение связано с погрешностью, приемлемой только в условиях учебного расчёта. При выполнении же точных технических расчётов такое упрощение недопустимо.

Всё сказанное относится и к задачам 61-70 на дросселирование водяного пара, решение которых следует выполнять с помощью  $hs$  – диаграммы. Нам представляется, что приобретение твёрдых навыков применения этой диаграммы в расчётах на том этапе изучения технической термодинамики, которому соответствует выполнение данного задания, имеет более существенное значение, чем упражнения в пользовании таблицами водяного пара, которым было уделено достаточно большое внимание в первой части курса.

### **ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ:**

1. В резервуаре находится 100 кг влажного пара при степени сухости  $x = 0,8$  и температуре  $t = 250$  °С. Определить объём резервуара.
2. В сосуде объёмом  $V = 1$  л находится в равновесии смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды. Найти степень сухости смеси, если её масса  $M = 0,1$  кг, а температура  $t = 300$  °С.
3. В барабане котельного агрегата находится кипящая вода и над ней насыщенный пар. Определить массу пара, если объём барабана  $V = 8$  м<sup>3</sup>, абсолютно давление  $p = 1,5$  МПа и масса воды  $M_{\text{в}} = 6000$  г. Принять пар, находящийся над водой, сухим насыщенным.
4. Барабан парового котла объёмом  $V = 15$  м<sup>3</sup> заполнили на 50% сухим насыщенным паром и на 50% - кипящей водой. Определить энтальпию образовавшегося в барабане влажного пара, если давление его  $p = 10$  МПа.
5. Водяной пар, имея абсолютное давление  $p = 5$  МПа и степень сухости  $x = 0,88$ , течёт по трубе со скоростью 20 м/с. Определить диаметр трубы, если расход пара  $D = 1,5$  кг/с.
6. Для получения 4,5 кг/с воды с температурой 90 °С имеется влажный пар при абсолютном давлении  $p = 0,15$  МПа и степени сухости  $x = 0,9$  и вода с температурой 12 °С. Определить секундный расход пара и воды.
7. Водяной пар при абсолютном давлении  $p = 1,5$  МПа имеет энтальпию  $h = 2450$  кДж/кг. Определить параметры пара и его состояние.
8. Водяной пар при температуре  $t = 300$  °С имеет энтропию 7 кДж/(кг\*К). Определить параметры пара и его состояние.
9. В барабане парового котла находится влажный пар при абсолютном давлении  $p = 20$  МПа и степени сухости  $x = 0,4$ . Определить массу влажного пара, а также объём воды и сухого насыщенного пара, если объём парового котла  $V = 12$  м<sup>3</sup>.
10. Определить объём 120 кг влажного пара при абсолютном давлении  $p = 10$  МПа и степени сухости  $x = 0,8$ . Насколько увеличится

объём пара, если довести степень сухости его до единицы при том же давлении?

**11.** 1 кг водяного пара, имея начальные параметры  $p_1 = 1,4$  МПа (абсолютных) и  $v_1 = 0,12$  м<sup>3</sup>/кг, нагревается при постоянном давлении до температуры  $t_2 = 270$  °С. Определить конечный объём пара, изменение внутренней энергии, подведённое тепло и совершённую паром работу. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**12.** 1 кг сухого насыщенного водяного пара находится в закрытом сосуде при абсолютном давлении  $p_1 = 0,8$  МПа. Пар охлаждается до температуры  $t_2 = 150$  °С. Определить конечное давление, степень сухости и количество отведённого тепла. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**13.** 4 кг влажного водяного пара, находящегося в закрытом сосуде при абсолютном давлении  $p_1 = 0,1$  МПа и степени сухости  $x_1 = 0,83$ , нагреваются до температуры, соответствующей увеличению давления на 20%. Определить конечную температуру, степень сухости, количество подведённого тепла. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**14.** В паровом котле находится 8000 кг пароводяной смеси, степень сухости которой  $x_1 = 0,002$ , абсолютное давление  $p_1 = 0,5$  МПа. Определить время, необходимое для достижения давления смеси  $p_2 = 1$  МПа при закрытых вентилях, если смеси сообщается 20 МДж/мин тепла. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**15.** Начальное состояние водяного пара характеризуется абсолютным давлением  $p_1 = 0,4$  МПа и температурой  $t_1 = 250$  °С. В результате впрыскивания кипящей воды того же давления пар становится сухим насыщенным: давление смеси при этом остаётся постоянным. Определить количество впрыскиваемой воды на 1 кг пара и работу, совершённую в этом процессе. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**16.** 4 кг водяного пара, имеющие начальное абсолютное давление  $p_1 = 0,9$  МПа, расширяются при постоянной температуре от объёма

$V_1 = 0,2 \text{ м}^3$  до объёма  $V_2 = 0,4 \text{ м}^3$ . Определить работу расширения и количество подведённого тепла. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**17.** 1 кг водяного пара, имея абсолютное давление  $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ , температуру  $t_1 = 200 \text{ °С}$ , сжимается при постоянной температуре до объёма  $v_2 = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Определить конечные параметры пара и количество отведённого тепла. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**18.** Сухой насыщенный водяной пар расширяется без теплообмена с окружающей средой от температуры  $t_1 = 180 \text{ °С}$  до температуры  $t_2 = 50 \text{ °С}$ . Определить состояние и параметры пара в конце расширения, а также изменение энтальпии и работу расширения, отнесённые к 1 кг пара. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**19.** 1 кг водяного пара расширяется адиабатно. При этом абсолютное давление его меняется от  $p_1 = 9 \text{ МПа}$  до  $p_2 = 4 \text{ МПа}$ . Определить параметры пара, работу расширения и изменение внутренней энергии, если начальная температура пара  $t_1 = 400 \text{ °С}$ . Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**20.** 2 кг водяного пара, имея начальные параметры  $t_1 = 100 \text{ °С}$  и  $px_1 = 0,95$ , сжимаются без теплообмена с окружающей средой, при этом объём пара уменьшается в 8 раз. Определить параметры и состояние пара в конце расширения, а также изменение энтальпии и работу сжатия. Изобразить процесс в  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах.

**21.** Состояние влажного воздуха при температуре  $20 \text{ °С}$  определяется с помощью гигрометра, которым измерена точка росы, равная  $8 \text{ °С}$ . Определить относительную влажность  $\varphi$ , влагосодержание  $d$  и энтальпию  $h$  влажного воздуха. Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**22.** Для воздуха, который при температуре  $t = 40 \text{ °С}$  и барометрическом давлении  $B = 0,1 \text{ МПа}$  имеет относительную влажность  $\varphi = 50 \%$ , определить влагосодержание, плотность, энтальпию и

температуру точки росы. Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**23.** Воздух, имея температуру  $t_1 = 40$  °С и относительную влажность  $\varphi_1 = 60$  %, охлаждается до температуры  $t_2 = 20$  °С. Определить количество выделившейся воды и отведённого тепла в этом процессе. Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**24.** Для сушки используется воздух при  $t_1 = 15$  °С и  $\varphi_1 = 10$  %. В калорифере температура его повышается до  $t_2 = 50$  °С, с этой температурой он поступает в сушильный аппарат, где температура его понижается до  $t_3 = 30$  °С. Определить расход воздуха и тепла на 1 кг испарённой влаги. Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**25.** Газовый двигатель всасывает  $200$  м<sup>3</sup>/кг воздуха при температуре  $t = 30$  °С, давлении  $p = 0,1$  МПа и относительной влажности  $\varphi = 0,7$ . Какое количество воды всасывается двигателем за 1 ч? Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**26.** Во влажном воздухе с параметрами  $t_1 = 80$  °С и  $\varphi_1 = 5$  % испаряется вода при отсутствии теплообмена с внешней средой. Температура воздуха при этом понижается до  $t_2 = 40$  °С. Определить относительную влажность  $\varphi_2$  и влагосодержание  $d_2$  воздуха в конечном состоянии. Задачу решить при помощи  $Id$  – диаграммы и привести схему решения.

**27.** От материала, помещённого в сушилку, необходимо отнять  $2000$  кг воды. Наружный воздух, имея температуру  $t_1 = 15$  °С и относительную влажность  $\varphi_1 = 0,3$ , проходит через калорифер и подогревается, а затем он поступает в сушилку и выходит из неё при  $t_2 = 50$  °С и относительной влажности  $\varphi_2 = 0,9$ . Определить количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку. Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**28.** Для сушки используют воздух с температурой  $t_1 = 15$  °С и относительной влажностью  $\varphi_1 = 50$  %. В калорифере его подогревают до температуры  $t_2 = 90$  °С и направляют в сушилку, откуда он выходит с

температурой  $t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и тепла на 1 кг испарённой влаги. Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**29.** Для влажного воздуха при температуре  $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $\varphi = 40 \%$  определить влагосодержание, энтальпию, температуру точки росы, а также парциальное давление пара и сухого воздуха, если барометрическое давление  $B = 0,1 \text{ МПа}$ . Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**30.** Определить относительную влажность, влагосодержание и плотность влажного воздуха при температуре  $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$  и парциальном давлении пара  $p_{\text{п}} = 1,5 \text{ кПа}$ , если барометрическое давление  $B = 0,1 \text{ МПа}$ . Задачу решить при помощи  $hd$  – диаграммы и привести схему решения.

**31.** Азот с начальными параметрами  $p_1 = 5 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  поступает со скоростью  $w_1 = 15 \text{ м/с}$  в суживающееся сопло, диаметр выходного отверстия которого  $d_2 = 10 \text{ мм}$ , и выходит через него в среду давлением  $p_2 = 4 \text{ МПа}$ . Пренебрегая потерями и теплообменом со стенками, определить скорость, удельный объём и температуру азота на выходе из сопла, а также его массовый расход через сопло.

**32.** Определить скорость истечения, конечные параметры и массовый расход углекислого газа через суживающееся сопло с диаметром выходного отверстия  $d_2 = 8 \text{ мм}$ , если начальные параметры его  $p_1 = 8 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , а давление среды, в которую происходит истечение,  $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ . Потерями, теплообменом со стенками и начальной скоростью газа пренебречь.

**33.** Через суживающееся сопло форсунки в цилиндр двигателя внутреннего сгорания подаётся распыливающий воздух с начальными параметрами  $p_1 = 6 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить скорость истечения, а также удельный объём и температуру воздуха при выходе из сопла, если температура в цилиндре  $p_2 = 4 \text{ МПа}$ . Потерями, теплообменом со стенками и начальной скоростью газа пренебречь.

**34.** Воздух с начальными параметрами  $p_1 = 0,2$  МПа и  $t_1 = 20$  °С вытекает через суживающееся сопло в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить скорость и параметры воздуха на выходе из сопла, а также площадь выходного сечения, если расход воздуха  $M = 0,5$  кг/с. Потерями, теплообменом со стенками и начальной скоростью газа пренебречь.

**35.** Воздух с начальными параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $t_1 = 20$  °С вытекает через суживающееся сопло в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Расход воздуха  $M = 5$  кг/с. Определить выходной диаметр сопла, если его скоростной коэффициент  $\varphi = 0,92$ . Скоростью воздуха на входе в сопло пренебречь.

**36.** Воздух с начальными параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $t_1 = 200$  °С вытекает из сопла Лавая в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Расход воздуха  $M = 6$  кг/с. Определить диаметр выходного сечения сопла, если его скоростной коэффициент  $\varphi = 0,95$ . Скоростью воздуха на входе в сопло пренебречь.

**37.** К соплам газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива с начальными параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $t_1 = 600$  °С. Давление за соплами  $p_2 = 0,12$  МПа. Определить площадь выходного сечения каждого из сопел, если расход продуктов сгорания через него  $M = 0,5$  кг/с. Потерями на трение, теплообменом со стенками и скоростью на входе в сопло пренебречь. Для упрощения расчётов продукты сгорания топлива заменять воздухом.

**38.** Определить скорость истечения воздуха через сопло Лавая, если начальные параметры воздуха  $p_1 = 0,8$  МПа и  $t_1 = 700$  °С, а давление среды на выходе из сопла равно атмосферному ( $p_2 = 0,1$  МПа). Скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,92$ . Скоростью воздуха на входе в сопло пренебречь.

**39.** Определить длину расширяющейся части сопла Лавая, через которое происходит истечение воздуха с начальными параметрами  $p_1 = 1,6$  МПа и  $t_1 = 600$  °С в количестве  $M = 0,6$  кг/с в среду с атмосферным давлением ( $p_2 = 0,1$  МПа). Угол конусности принять равным  $10^\circ$ , скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,93$ . Скоростью на входе в сопло пренебречь.

**40.** Азот с начальными параметрами  $p_1 = 2$  МПа и  $t_1 = 300$  °С вытекает в количестве  $M = 0,5$  кг/с через сопло Лаваля в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить площадь минимального и выходного сечений сопла, если его скоростной коэффициент  $\varphi = 0,90$ . Скоростью воздуха на входе в сопло пренебречь.

**41.** Определить скорость истечения перегретого пара через суживающееся сопло, если начальные параметры пара  $p_1 = 0,6$  МПа и  $t_1 = 350$  °С, а давление среды, в которую происходит истечение,  $p_2 = 0,4$  МПа. Скоростью на входе в сопло, потерями и теплообменом со стенками пренебречь.

**42.** Определить скорость истечения перегретого пара через суживающееся сопло, если начальные параметры пара  $p_1 = 0,6$  МПа и  $t_1 = 350$  °С, а давление среды, в которую происходит истечение,  $p_2 = 0,1$  МПа. Потерями, теплообменом со стенками и скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

**43.** Как велика скорость истечения перегретого пара через сопло Лаваля, если начальные параметры его  $p_1 = 1,4$  МПа и  $t_1 = 300$  °С, а конечное давление  $p_2 = 0,006$  МПа? Чему была бы равна эта скорость, если бы сопло было суживающимся? Теплообменом со стенками, потерями и скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

**44.** Влажный пар с начальными параметрами  $p_1 = 1,5$  МПа и  $x_1 = 0,95$  вытекает из сопла Лаваля в среду с давлением  $p_2 = 0,2$  МПа в количестве  $M = 5$  кг/с. Определить площадь минимального и выходного сечений сопла, если скоростной коэффициент его  $\varphi = 0,95$ . Скоростью на входе в сопло пренебречь.

**45.** Определить диаметр минимального и выходного сечений сопла Лаваля обдувочного аппарата парового котла с расходом сухого насыщенного пара  $M = 0,3$  кг/с, если начальное давление пара  $p_1 = 2$  МПа, а конечное  $p_2 = 0,1$  МПа. Скоростью пара на входе в сопло, потерями и теплообменом со стенками пренебречь.

**46.** Производительность парового котла  $D = 2$  кг/с при давлении 1,4 МПа. Какой должна быть площадь сечения предохранительного клапана, чтобы при внезапном сокращении отбора пара давление не превысило указанной выше величины? Потерей давления на дросселирование и скоростью пара на входе в клапан пренебречь. Пар в барабане котла считать сухим насыщенным, атмосферное давление принять равным 0,1 МПа.

**47.** Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 3$  МПа и  $t_1 = 400$  °С расширяется при истечении через сопло Лавалья до давления  $p_2 = 0,2$  МПа. Определить диаметр минимального и выходного сечений сопла, если расход пара  $M = 5$  кг/с. Потерями, теплообменом со стенками и скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

**48.** Перегретый пар с начальными параметрами  $p_1 = 1,5$  МПа и  $t_1 = 300$  °С вытекает через суживающееся сопло в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить скорость истечения, если скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,90$ . Скоростью на входе в сопло пренебречь.

**49.** Влажный пар с начальными параметрами  $p_1 = 1,6$  МПа и  $x_1 = 0,98$  вытекает через суживающееся сопло с площадью выходного сечения  $f = 40$  мм<sup>2</sup> в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить секундный расход пара, если скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,92$ . Скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

**50.** Перегретый пар с начальными параметрами  $p_1 = 6$  МПа и  $t_1 = 400$  °С вытекает через суживающееся сопло в атмосферу ( $p_2 = 0,1$  МПа). Определить секундный расход пара, если площадь выходного сечения сопла  $f = 30$  мм<sup>2</sup>, а скоростной коэффициент его  $\varphi = 0,95$ . Скоростью пара на входе в сопло пренебречь.

**51.** При движении воздуха по трубопроводу его давление понижается вследствие местных сопротивлений от  $p_1 = 1$  МПа до  $p_2 = 0,8$  МПа. Пренебрегая скоростью воздуха, определить изменение его энтропии. Найти также удельный объём воздуха до и после его дросселирования в местных

сопротивлениях, если температура воздуха на входе в трубопровод  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**52.** Скорость воздуха на входе в трубопровод  $w_1 = 8 \text{ м/с}$  при параметрах  $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вследствие местных сопротивлений и трения в трубопроводе его давление понижается до  $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$ . Определить скорость на выходе из трубопровода, если диаметр последнего не изменяется. Найти также величину энтальпии воздуха в начале и в конце трубопровода и определить погрешность равенства  $h_1 = h_2$ , являющегося в данном случае приближённым.

**53.** Пусковой воздух для двигателя Дизеля находится в баллоне при параметрах  $p_1 = 5 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . При подаче воздуха в цилиндр двигателя он дросселируется в вентиле баллона до давления  $p_2 = 2,5 \text{ МПа}$  и в пусковом клапане двигателя до  $p_3 = 1,6 \text{ МПа}$ . Определить изменение энтропии воздуха при первом и втором дросселировании, а также удельный объём его после первого и второго дросселирования. Скоростью воздуха пренебречь.

**54.** В баллоне находится кислород при параметрах  $p_1 = 15 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ . При выпуске из баллона он дросселируется до  $p_2 = 12 \text{ МПа}$ . Пренебрегая скоростью воздуха, определить изменение энтропии воздуха при дросселировании, а также его удельный объём до и после дросселирования.

**55.** 6 кг азота при начальных параметрах  $p_1 = 1,2 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  дросселируются так, что объём всего азота становится  $V_2 = 1 \text{ м}^3$ . Определить давление, до которого дросселируется азот, а также изменение его энтропии при дросселировании. Скорость азота при дросселировании не изменяется.

**56.** Продукты сгорания топлива с начальными параметрами  $p_1 = 1 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$  перед поступлением в газовую турбину, работающую на выхлоп в атмосферу ( $p_3 = 0,1 \text{ МПа}$ ), дросселируются в регулирующем устройстве до  $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$ . Определить связанную с этим потерю располагаемого теплопоявления, а также изменение энтропии рабочего

тела. Для упрощения расчёта продукты сгорания заменить воздухом, изменением скорости потока в турбине пренебречь.

**57.** Определить потерю эксергии воздуха при дросселировании его с понижением давления от  $p_1 = 2$  МПа до  $p_2 = 1,5$  МПа. Температуру окружающей среды принять  $t_0 = 20$  °С, изменением скорости потока пренебречь.

**58.** Природный газ поступает в газопровод постоянного сечения со скоростью  $w_1 = 10$  м/с при параметрах  $p_1 = 0,5$  МПа и  $t_1 = 20$  °С. Вследствие дросселирования в запорных устройствах и трения давление его понижается до  $p_2 = 0,4$  МПа. Определить связанные с этим изменение скорости, энтальпии и температуры потока. Для упрощения расчета природный газ заменить метаном.

**59.** Продукты сгорания топлива с параметрами  $p_1 = 2$  МПа и  $t_1 = 650$  °С проходят через регулирующий клапан, где дросселируются до  $p_2 = 1,8$  МПа, а затем поступают в газовую турбину, где расширяются до атмосферного давления ( $p_3 = 0,1$  МПа). Определить связанную с этим потерю теоретической мощности турбины, если расход рабочего тела  $M = 25$  кг/с. Для упрощения расчёта продукты сгорания заменить воздухом.

**60.** Продукты сгорания топлива с параметрами  $p_1 = 1,5$  МПа и  $t_1 = 700$  °С дросселируются в регулирующем клапане газовой турбины до  $p_2 = 1,2$  МПа, а затем расширяются в газовой турбине до атмосферного давления ( $p_3 = 0,1$  МПа). Определить потерю располагаемой работы, связанную с дросселированием рабочего тела. Для упрощения расчёта продукты сгорания заменить воздухом.

**61.** Влажный пар с параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $x_1 = 0,9$  дросселируется в редукционном клапане до  $p_2 = 0,12$  МПа. Пренебрегая изменением скорости пара в паропроводе, определить состояние и параметры пара после дросселирования, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара в этом процессе.

**62.** Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 2$  МПа и  $t_1 = 350$  °С дросселируется в регулирующем клапане паровой турбины до  $p_2 = 1,5$  МПа, а затем расширяется в ней до  $p_3 = 0,004$  МПа. Определить потерю располагаемой работы вследствие дросселирования.

**63.** В клапанах турбины перегретый пар с параметрами  $p_1 = 6$  МПа и  $t_1 = 400$  °С дросселируется до  $p_2 = 5$  МПа, а затем расширяется в турбине до  $p_3 = 0,004$  МПа. Определить потерю теоретической мощности турбины вследствие дросселирования, если расход пара  $D = 10$  кг/с.

**64.** Определить, до какого давления нужно дросселировать влажный пар с параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $x_1 = 0,95$ , чтобы он стал сухим насыщенным. Определить также изменение внутренней энергии и энтропии пара в этом процессе. Изменением скорости пара при дросселировании пренебречь.

**65.** Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 5$  МПа и  $t_1 = 350$  °С дросселируется до  $p_2 = 2$  МПа. Определить состояние и параметры пара после дросселирования, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара в этом процессе. Скоростью пара и изменением её при дросселировании пренебречь.

**66.** Параметры влажного пара в магистральном паропроводе  $p_1 = 1,4$  МПа и  $x_1 = 0,98$ . Часть пара перепускается через дроссельный вентиль в паропровод низкого давления, в котором  $p_2 = 0,12$  МПа. Пренебрегая изменением скорости при дросселировании, определить состояние и параметры пара в паропроводе низкого давления, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара при дросселировании.

**67.** Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 1,8$  МПа и  $t_1 = 250$  °С дросселируется до  $p_2 = 1$  МПа. Пренебрегая изменением скорости при дросселировании, определить конечное состояние пара и его параметры, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара при дросселировании.

**68.** Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 10$  МПа и  $t_1 = 310$  °С дросселируется до  $p_2 = 1$  МПа. Определить конечное состояние пара и его

параметры, а также изменение внутренней энергии и энтропии пара при дросселировании.

**69.** Влажный пар с параметрами  $p_1 = 1,5$  МПа и  $x_1 = 0,85$  и скоростью  $w_1 = 10$  м/с поступает в дроссельный вентиль, где давление его снижается до атмосферного ( $p_2 = 0,1$  МПа). Считая, что площадь сечения трубопровода не изменяется, определить скорость пара за дроссельным вентилем и вычислить погрешность исходного равенства  $h_1 = h_2$ , связанную с изменением скорости пара вследствие дросселирования.

**70.** Перегретый пар с параметрами  $p_1 = 3$  МПа и  $t_1 = 300$  °С дросселируется в регулирующем клапане до  $p_2 = 2,6$  МПа, а затем расширяется в турбине, работающей на выхлоп в атмосферу ( $p_3 = 0,1$  МПа). Определить потерю располагаемой работы вследствие дросселирования.

### ***КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:***

- 1.** Есть ли принципиальное различие между парами и газами и в чём оно заключается?
- 2.** Что называется влажным, сухим насыщенным и перегретым паром? Каковы основные свойства пара, находящегося в этих состояниях?
- 3.** Какой параметр применяется для определения состояния влажного пара вместо температуры и почему?
- 4.** Что такое фаза и что называется фазовым превращением? Приведите формулу правила фаз Гиббса и разьясните её.
- 5.** Дайте вывод уравнения Клапейрона-Клаузиуса для теплоты парообразования и покажите, как его можно использовать для определения тепла плавления и сублимации твёрдых тел.
- 6.** Покажите, как изображается в  $Ts$  – диаграмме энтальпия кипящей воды, сухого насыщенного пара и перегретого пара.
- 7.** Свяжите вопрос о крутизне изобар перегретого пара в  $Ts$  – диаграмме с изменением его теплоёмкости.

8. Изобразите в  $Ts$  – диаграмме водяного пара расположения нижней пограничной кривой относительно какой-либо сверхкритической изобары. Дайте пояснения к графику.

9. Объясните, почему изобары воды в  $Ts$  – диаграмме располагаются левее нижней пограничной кривой, а также покажите область, в которой это правило нарушается.

10. За счёт чего происходит изменение внутренней энергии в изотермическом процессе водяного пара и как его подсчитать при заданных начальных и конечных параметрах  $p, v, h$ .

11. Покажите с помощью  $Ts$  – диаграммы, как будет меняться влажность пара в адиабатных процессах сжатия, если в первом случае процесс протекает при значении энтропии меньше критического, а во втором – больше критического.

12. Покажите с помощью  $pv$  – диаграммы, как будет меняться влажность пара в изохорных процессах нагревания, если в первом случае процесс протекает при объёме меньше критического, а во втором – больше критического.

13. Что такое теплота парообразования? Какие две части можно рассматривать в ней и почему?

14. Как при помощи таблиц водяного пара можно определить, в каком состоянии находится вода, если известны её параметры? Покажите, в чём условность верхней границы области жидкости в  $pv$  – диаграмме.

15. Что такое процессы испарения и кипения? Чем они отличаются друг от друга? Являются ли давление и температура при кипении независимыми параметрами?

16. Как могут быть вычислены параметры в области влажного пара?

17. Изобразите  $pv$  – диаграмму для воды и водяного пара и покажите, как в этой диаграмме изображаются характерные линии. Поясните, на какие области можно разделить  $pv$  – диаграмму. Какие состояния

откладываются на нижней и верхней пограничных кривых? Что такое степень сухости и влажность пара?

**18.** Как могут быть графически построены линии постоянной сухости в  $pv$ –,  $Ts$  – и  $hs$  – диаграммах?

**19.** Изобразите в  $hs$  – диаграмме воды и водяного пара нижнюю и верхнюю пограничные кривые. Покажите, какой характер и почему будут иметь изобары в области влажного и перегретого пара.

**20.** Изобразите  $hs$  – диаграмму воды и водяного пара. Каков характер нижней и верхней пограничных кривых в этой диаграмме? Где будет располагаться критическая точка?

**21.** Что такое температура точки росы и как её можно определить?

**22.** Что называется влажным воздухом? Какой влажный воздух считается насыщенным и какой - ненасыщенным?

**23.** Что такое влагосодержание влажного воздуха и в каких единицах оно измеряется? Какие максимальные значения может иметь влагосодержание и в каких случаях?

**24.** Почему влажный воздух, представляющий собой смесь сухого воздуха и водяного пара, можно считать с достаточной степенью точности идеальным газом? Что такое абсолютная влажность влажного воздуха?

**25.** Почему, если температура влажного воздуха больше температуры насыщения водяного пара, соответствующей полному давлению влажного воздуха, относительная влажность будет зависеть только от влагосодержания?

**26.** Что такое относительная влажность влажного воздуха? Чему может быть равно максимальное давление водяного пара в смеси? Какие при этом должны соблюдаться условия?

**27.** Как можно подсчитать объём влажного воздуха, приходящийся на 1 кг сухого воздуха?

**28.** Что такое температура мокрого термометра? Почему её можно называть температурой адиабатного насыщения влажного воздуха?

29. Почему процесс испарения в идеальной сушилке изображается в  $hd$  – диаграмме линией  $h = const$ ?
30. Изобразите  $hd$  – диаграмму влажного воздуха. Дайте её описание.
31. Какое допущение позволяет процессы в потоке, движущемся с конечной скоростью, считать обратимыми?
32. Напишите уравнение первого закона термодинамики для потока в развёрнутой форме и дайте анализ размерностей входящих в него величин.
33. На что затрачивается работа расширения рабочего тела при осуществлении термодинамического процесса в потоке?
34. Что такое работа проталкивания и как она вычисляется?
35. Что такое техническая работа потока? В каких случаях она положительна, а в каких - отрицательна?
36. Что такое располагаемая работа потока? Как она выражается математически и как изображается в  $pv$  – диаграмме?
37. Из каких составляющих складывается в общем случае располагаемая работа потока и когда отдельными составляющими можно пренебречь?
38. Изобразите в  $pv$  – диаграмме адиабатный процесс повышения давления воды в насосе, считая её несжимаемой. На что расходуется в этом случае техническая работа привода?
39. Упростите уравнение первого закона термодинамики применительно к адиабатному расширению рабочего тела в идеальном двигателе. Изобразите этот процесс в  $pv$  – диаграмме и покажите на графике совершаемую в нём техническую работу.
40. Что такое располагаемое теплопадение? Можно ли его полностью использовать на совершение технической работы в реальном двигателе?
41. Какие условия должны быть соблюдены для того, чтобы техническая работа была максимальной?
42. Какие процессы необходимо осуществить в потоке, чтобы переход его в состояние равновесия с окружающей средой был обратимым?

**43.** Изобразите в  $Ts$  – диаграмме график обратимого перехода газового потока в состояние равновесия с окружающей средой и поясните его.

**44.** Изобразите в  $Ts$  – диаграмме график обратимого перехода потока перегретого пара в состояние равновесия с окружающей средой и поясните его.

**45.** Что такое эксергия потока? Изобразите в  $pv$  – диаграмме график обратимого перехода газового потока в состояние равновесия с окружающей средой и покажите на этом графике эксергию потока.

**46.** Напишите формулу для эксергии потока и поясните её, приведя для иллюстрации график эксергии потока перегретого пара в  $Ts$  – диаграмме.

**47.** Что такое прямая окружающей среды? Покажите, как с её помощью можно определить эксергию потока.

**48.** На что расходуется эксергия потока при обратимом адиабатном расширении? Имеет ли место в этом случае потеря эксергии?

**49.** Покажите, что при протекании в термически изолированной системе необратимых процессов происходит потеря эксергии.

**50.** Сформулируйте теорему Гуй-Стодолы применительно к потоку, совершающему техническую работу при наличии в нём необратимых процессов.

**51.** Для осуществления каких процессов применяются сопла и диффузоры? Приведите примеры технического использования этих устройств.

**52.** Упростите уравнение первого закона термодинамики применительно к процессам в соплах и диффузорах. Покажите с помощью полученного уравнения, что изменение скорости потока в таких процессах всегда обратно по знаку изменению давления.

**53.** Как получить уравнение неразрывности потока в дифференциальной форме?

**54.** Преобразуйте уравнение неразрывности потока в дифференциальной форме применительно к истечению идеального газа.

**55.** Сформулируйте закон геометрического обращения воздействия и обоснуйте его анализом дифференциального уравнения неразрывности потока, преобразованного применительно к истечению идеального газа.

**56.** Упростите уравнение первого закона термодинамики для потока применительно к случаю адиабатного истечения через сопло и получите из него выражение для скорости потока за соплом в общем виде и применительно к идеальному газу.

**57.** Как физически объяснить, почему при снижении внешнего давления ниже критического скорость истечения через суживающееся сопло перестаёт увеличиваться?

**58.** Изобразите в  $pv$  – диаграмме графики адиабатного расширения рабочего тела при истечении через суживающееся сопло при  $p_2/p_1 > v_{кр}$  и  $p_2/p_1 < v_{кр}$  и покажите на графиках кинетическую энергию вытекающей струи в предположении, что скорость рабочего тела на входе в сопло равна нулю.

**59.** Обоснуйте устройство сопла Лавалья с помощью закона геометрического обращения воздействия. Какую форму должен иметь диффузор, если скорость потока на входе больше критической?

**60.** Изобразите условный график необратимого истечения пара через сопло в  $hs$  – диаграмме. Покажите на нём располагаемое и использованное теплопадение, а также потерю, обусловленную необратимостью процесса.

**61.** Опишите реальный процесс дросселирования. Какие предпосылки положены в основу идеализации этого процесса в технической термодинамике?

**62.** Преобразуйте уравнение первого закона термодинамики для потока применительно к идеальному процессу дросселирования и с его помощью покажите, что у идеального газа температура в этом процессе не изменяется, а у реального газа зависит от сжимаемости и соотношения между

кинетической и потенциальной составляющими внутренней энергии этого газа.

**63.** Сопоставьте процесс адиабатного дросселирования с обратимыми процессами адиабатного и изотермического расширения. На что затрачивается работа расширения при дросселировании? Как вычислить изменение энтропии идеального газа при дросселировании?

**64.** Выведите формулу для определения дифференциального дроссель-эффекта. Какую особенность поведения реальных газов при дросселировании характеризует эта величина?

**65.** Что такое температура инверсии? Какие предпосылки положены в основу составления уравнения инверсионной кривой?

**66.** Изобразите кривую инверсии для реального газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса. Какие выводы можно сделать из анализа этой кривой?

**67.** Покажите в  $Tv$  – диаграмме, что температура в точке касания касательной, проведённой из начала координат к изобаре, будет температурой инверсии при данном давлении. Как изменяется при дросселировании температура газа в точках на той же изобаре, расположенных справа и слева от указанной точки касания?

**68.** Сопоставьте температурный эффект охлаждения при обратимом адиабатном расширении и адиабатном дросселировании. При каком условии он будет одинаковым для обоих процессов? Проиллюстрируйте полученные выводы с помощью  $hs$  – диаграммы водяного пара.

**69.** Покажите с помощью  $hs$  – диаграммы, как изменяется состояние водяного пара при дросселировании.

**70.** Покажите с помощью  $hs$  – диаграммы, что дросселирование водяного пара сопряжено с потерей располагаемой работы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1.** Злобин В. Г., Горбай С. В., Короткова Т. Ю. Техническая термодинамика. Часть 1. Основные законы термодинамики. Циклы тепловых двигателей: учебное пособие. -2 изд., испр. и перераб./ВШТЭ СПбГУПТД. - СПб., 2016.- 146 с.
- 2.** Злобин В. Г., Горбай С. В., Короткова Т. Ю. Техническая термодинамика. Часть 2. Водяной пар. Циклы теплосиловых установок: учебное пособие. -2-е изд., испр. и перераб./ВШТЭ СПбГУПТД. -СПб., 2016. - 90 с.
- 3.** Кирилин В. А., Сычев В. В., Шейдулин А. Е. Техническая термодинамика: учебник для вузов. -5-е изд., перераб. и доп. /МЭИ. –М., 2008. - 496 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

Молекулярная масса, плотность и объём киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

| Вещество                      | Химическое обозначение        | Молекулярная масса $\mu$<br>кг/кмоль | Плотность $\rho$<br>кг/м <sup>3</sup> | Объём киломоля<br>$\mu v$<br>м <sup>3</sup> /кг |
|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Воздух                        | -                             | 28,96                                | 1,293                                 | 22,40   |
| Кислород                      | O <sub>2</sub>                | 32,00                                | 1,429                                 | 22,39   |
| Азот                          | N <sub>2</sub>                | 28,026                               | 1,251                                 | 22,4  |
| Атмосферный азот <sup>1</sup> | N <sub>2</sub>                | 28,16                                | (1,257)                               | (22,40)   |
| Гелий                         | He                            | 4,003                                | 0,179                                 | 22,42   |
| Аргон                         | Ar                            | 39,994                               | 1,783                                 | 22,39   |
| Водород                       | H <sub>2</sub>                | 2,016                                | 0,090                                 | 22,43   |
| Окись углерода                | CO                            | 28,01                                | 1,250                                 | 22,40   |
| Двуокись углерода             | CO <sub>2</sub>               | 44,01                                | 1,977                                 | 22,26   |
| Сернистый газ                 | SO <sub>2</sub>               | 64,06                                | 2,926                                 | 21,89   |
| Метан                         | CH <sub>4</sub>               | 16,032                               | 0,717                                 | 22,39   |
| Этилен                        | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 28,052                               | 1,251                                 | 22,41   |
| Коксовый газ                  | -                             | 11,50                                | 0,515                                 | 22,33   |
| Аммиак                        | NH <sub>3</sub>               | 17,032                               | 0,771                                 | 22,08   |
| Водяной пар <sup>2</sup>      | H <sub>2</sub> O              | 18,016                               | (0,804)                               | (22,40)   |

<sup>1</sup> Атмосферный азот – условный газ, состоящий из азота воздуха вместе с двуокисью углерода и редкими газами, содержащимися в воздухе.

<sup>2</sup> Приведение водяного пара к нормальному состоянию является условным.

Интерполяционные формулы  
для истинных и средних показателей мольной теплоёмкости газов

| Газ                    | Мольная теплоёмкость при $p=\text{const}$ в кДж/(кмоль·К) |                                       |
|------------------------|---|---------------------------------------|
|                        | истинная  | средняя                               |
| В пределах 0-1000°C    |   |                                       |
| O <sub>2</sub>         | $\mu_{c_p} = 29,5802 + 0,0069706t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 29,2080 + 0,0040717t$ |
| N <sub>2</sub>         | $\mu_{c_p} = 28,5372 + 0,0053905t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 28,7340 + 0,0023488t$ |
| CO                     | $\mu_{c_p} = 28,7395 + 0,0058862t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 28,8563 + 0,0026808t$ |
| Воздух                 | $\mu_{c_p} = 28,7558 + 0,0057208t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 28,8270 + 0,0027080t$ |
| H <sub>2</sub> O       | $\mu_{c_p} = 32,8367 + 0,0116611t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 33,1494 + 0,0052749t$ |
| SO <sub>2</sub>        | $\mu_{c_p} = 42,8728 + 0,0132043t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 40,4386 + 0,0099562t$ |
| В пределах 0-1500°C    |   |                                       |
| H <sub>2</sub>         | $\mu_{c_p} = 28,3446 + 0,0031518t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 28,7210 + 0,0012008t$ |
| CO <sub>2</sub>        | $\mu_{c_p} = 41,3597 + 0,0144985t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 38,3955 + 0,0105838t$ |
| В пределах 1000-2700°C |   |                                       |
| O <sub>2</sub>         | $\mu_{c_p} = 33,8603 + 0,021951t$                         | $\mu_{c_{pm}} = 31,5731 + 0,0017572t$ |
| N <sub>2</sub>         | $\mu_{c_p} = 32,7466 + 0,0016517t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 29,7815 + 0,0016835t$ |
| CO                     | $\mu_{c_p} = 33,6991 + 0,0013406t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 30,4242 + 0,0015579t$ |
| Воздух                 | $\mu_{c_p} = 32,9564 + 0,0017806t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 30,1533 + 0,0016973t$ |
| H <sub>2</sub> O       | $\mu_{c_p} = 40,2393 + 0,0059854t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 34,5118 + 0,0045979t$ |
| В пределах 1500-3000°C |   |                                       |
| H <sub>2</sub>         | $\mu_{c_p} = 31,0079 + 0,0020243t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 28,6344 + 0,0014821t$ |
| CO <sub>2</sub>        | $\mu_{c_p} = 56,8768 + 0,0021738t$                        | $\mu_{c_{pm}} = 48,4534 + 0,0030032t$ |

Интерполяционные формулы  
для средних массовых и объёмных показателей теплоёмкости газов

| Газ                 | Теплоёмкость в кДж/(кг·К)  |  |
|---------------------|--|--|
|                     | массовая   | объёмная   |
| В пределах 0-1000°C |  |  |
| O <sub>2</sub>      | $c_{pm} = 0,9127 + 0,00012724t$<br>$c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724t$   | $c'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183t$<br>$c'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183t$ |
| N <sub>2</sub>      | $c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382t$<br>$c_{vm} = 0,7289 + 0,00008382t$   | $c'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492t$<br>$c'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492t$ |
| CO                  | $c_{pm} = 1,0304 + 0,00009575t$<br>$c_{vm} = 0,7335 + 0,00009575t$   | $c'_{pm} = 1,2883 + 0,00011966t$<br>$c'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966t$ |
| Воздух              | $c_{pm} = 0,9952 + 0,00009349t$<br>$c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349t$   | $c'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091t$<br>$c'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091t$ |
| H <sub>2</sub> O    | $c_{pm} = 1,8401 + 0,00029278t$<br>$c_{vm} = 1,3783 + 0,00029278t$   | $c'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551t$<br>$c'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551t$ |
| SO <sub>2</sub>     | $c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541t$<br>$c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541t$   | $c'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547t$<br>$c'_{vm} = 1,4763 + 0,00004547t$ |
| В пределах 0-1500°C |  |  |
| H <sub>2</sub>      | $c_{pm} = 14,2494 + 0,00059574t$<br>$c_{vm} = 10,1241 + 0,00059574t$ | $c'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355t$<br>$c'_{vm} = 0,9094 + 0,00005355t$ |
| CO <sub>2</sub>     | $c_{pm} = 0,8725 + 0,00024053t$<br>$c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053t$   | $c'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756t$<br>$c'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756t$ |

Формулы для расчета газовых смесей

| Задание состава смеси | Перевод из одного состава в другой             | Плотность и удельные вес и объем   | Кажущаяся молекулярная масса смеси                | Газовая постоянная смеси                   | Парциальное давления             |
|-----------------------|--|--|---|--|----------------------------------|
| Массовыми долями      | $r_i = \frac{g_i}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$ | $v_{см} = \sum_1^n \frac{g_i}{\rho_i}$ $\rho_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\rho_i}}$ | $\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}$ | $R_{см} = \sum_1^n g_i R_i$                | $P_i = g_i \frac{R_i}{R_{см}} P$ |
| Объёмными долями      | $g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$   | $v_{см} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i}$ $\rho_{см} = \sum_1^n r_i \rho_i$                 | $\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i$                   | $R_{см} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$ | $P_i = r_i P$                    |

**Светлана Вячеславовна Горбай  
Максим Сергеевич Липатов**

# **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

**Методические указания  
к выполнению контрольных работ  
для обучающихся Института безотрывных форм обучения**

Редактор и корректор В.А.Басова  
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2019 г., поз. 94

---

Подп. к печати 12.08.2019                      Формат 60x84/16.                      Бумага тип. № 1.  
Печать офсетная.                      Объем 3,5 печ.л; 3,5 уч.-изд.л.                      Тираж 150 экз.  
Изд. № 94. Цена "С" . Заказ №

---

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,  
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.