

Министерство образования и науки Российской Федерации

Тихоокеанский государственный университет

Решения задач размещены на сайте zadachi24.ru

техническая термодинамика

Методические указания к выполнению контрольных работ для студентов
специальности ТГВ (290700) заочного обучения.

Хабаровск
Издательство ТОГУ
2008

УДК 621.1.016.7(076)

Техническая термодинамика: методические указания к выполнению двух контрольных работ для студентов специальности ТГВ (290700) заочного ускоренного обучения / Сост. Л. П. Бруй. –Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2008.

Методические указания составлены на кафедре «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция», включают основные сведения по расчету задач, исходные данные по вариантам заданий, необходимый справочный материал по физическим свойствам газов, рекомендации по выполнению контрольных работ.

Печатается в соответствии с решениями кафедры «Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» и методического совета методического заочного факультета.

Отдел оперативной полиграфии издательства Хабаровского государственного технического университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихookeанская, 136

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

При изучении технической термодинамики студенты – заочники, руководствуясь программой курса, самостоятельно работают над учебниками и учебными пособиями, выполняют контрольные и лабораторные работы. По основным вопросам курса рекомендуется прослушать обзорные лекции.

При самостоятельной работе студента над учебником необходимо добиваться отчетливого представления о физической сущности изучаемых явлений и процессов.

Курсы «Техническая термодинамика» и «Тепломассообмен» включают в себя вопросы, необходимые при изучении профилирующих дисциплин специальности ТГВ (290700): «Котельные установки», «Теплоснабжение», «Отопление», «Вентиляция и кондиционирование воздуха», «Газоснабжение».

Контрольные работы должны быть аккуратно оформлены в отдельных тетрадях, на обложке которых обязательно следует указать учебный шифр студента. Решение каждой задачи начинается с подробного изложения содержания задачи без сокращений из методического указания, выделив исходные данные, соответствующие шифру студента. Необходимо оставлять поля для заметок преподавателя. Обязательно также ответить на вопросы, предложенные для проверки усвоения материала. Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

При выполнении контрольных задач необходимо соблюдать следующие условия: решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какая величина определяется, и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (из условия задачи, из справочника или были определены выше и т.д.); вычисления проводить в единицах СИ, показывать ход решения. При решении задач рекомендуется пользоваться многофункциональным калькулятором.

Всегда, если это возможно, нужно осуществлять контроль своих действий и оценивать достоверность полученных численных результатов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Техническая термодинамика рассматривает вопросы взаимного превращения теплоты и работы, в том числе наиболее эффективные условия осуществления этих превращений. Кроме того, в курсе технической термодинамики изучаются свойства рабочих тел, участвующих в энергетических преобразованиях, и способы определения (расчета) термодинамических параметров состояния рабочих тел.

В качестве рабочего тела в технической термодинамике выступает вещество (газ, пар, жидкость). Следует разобраться в понятиях – идеальный газ и реальный газ.

Основными параметрами рабочего тела являются абсолютное давление P , удельный объем v , и абсолютная температура T . Эти параметры связаны уравнением состояния рабочего тела. Уравнением состояния идеального газа является уравнение Клапейрона, которое может быть записано для 1 кг вещества или для произвольного его количества. Уравнение состояния идеального газа для киломоля вещества предложено Менделеевым и носит название уравнения Менделеева-Клапейрона. Примером уравнения состояния реального газа является уравнение Ван-дер-Ваальса.

Уравнение состояния идеального газа, кроме основных параметров состояния, включает также газовую постоянную. Различают газовую постоянную 1 кг газа R и газовую постоянную киломоля газа универсальную газовую постоянную $R\mu$. Необходимо знать физический смысл R и $R\mu$, а также связь между ними.

Основные положения технической термодинамики рассматриваются на примере идеального газа.

Поскольку в тепловых машинах и аппаратах весьма часто в качестве рабочего тела выступают смеси газов (например, газообразные топливно-воздушные смеси, продукты сгорания топлива и др.), курс знакомит с методами расчета газовых смесей.

Приступая к изучению термодинамических процессов, следует иметь в виду, что классическая термодинамика рассматривает их как равновесные и обратимые.

При расчете термодинамических процессов с идеальным газом в качестве рабочего тела (изохорного, изобарного, адиабатного и обобщенного политропного процессов) прежде всего выясняют закономерности изменения основных параметров состояния рабочего тела P , v , T , а также определяют количество теплоты q_{1-2} , подведенное к рабочему телу (или отведенное от него) в ходе процесса, работу изменения объема рабочего тела I_{1-2} , изменения внутренней энергии рабочего тела $\Delta U = U_2 - U_1$ в процессе, изменение энタルпии $\Delta h = h_2 - h_1$ и изменение энтропии $\Delta S = S_2 - S_1$ в ходе процесса.

Для определения количества теплоты, участвующего в процессе, важно правильно определить теплоемкость рабочего тела. Вещества, находящиеся в газообразном состоянии, характеризуются массовой C , объемной C' и мольной μC теплоемкостями. Необходимо понять зависимость теплоемкости рабочего тела от физической природы вещества, от характера термодинамического процесса, в котором участвует рабочее тело. Необходимо научиться пользоваться таблицами теплоемкостей газов (таблицами истинных теплоемкостей, средних теплоемкостей в интервале температур от 0°C до заданной температуры) для определения теплоемкости в заданном интервале температур, а также определять теплоемкость как величину, независимую от температуры. Следует освоить формулы для

расчета теплоемкости рабочего тела в политропном процессе и формулы определения теплоемкостей газовых смесей.

В курсе технической термодинамики выводятся формулы для определения работы деформации l_{12} в различных термодинамических процессах.

Следует обратить внимание, что при изображении термодинамического процесса в координатах $p-v$ площадь между линией процесса и осью абсцисс характеризует работу деформации 1 кг рабочего тела в этом процессе- работу расширения (если $v_2 > v_1$) или работу сжатия (если $v_2 < v_1$). При изображении термодинамического процесса в координатах T_s площадь между линией процесса и осью абсцисс дает изображение количества теплоты, участвующего в этом процессе в расчете на 1 кг рабочего тела. Причем, если $\Delta s > 0$, то количество теплоты подводится к рабочему телу, а если $\Delta s < 0$, то при совершении термодинамического процесса рабочим телом теплота отводится от него.

При изучении курса необходимо понять физический смысл энталпии и энтропии, которые также как P , v , T и являются параметрами рабочего тела и освоить их использование в расчетах термодинамических процессов. Введение этих параметрических величин в курс дало возможность применять для анализа термодинамических процессов диаграмму $h-s$, которая нашла широкое применение в инженерной практике особенно для расчета процессов изменения состояния водяного пара.

Курс технической термодинамики базируется на двух принципиальных положениях – первом и втором началах термодинамики.

Первое начало термодинамики отражает закон сохранения и превращения энергии применительно к термодинамическому процессу. Он устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической работы и теплоты и количественное соотношение при переходе одного вида энергии в другой. Согласно первому началу термодинамики нельзя построить вечный двигатель первого рода, т. е. тепловую машину, которая бы совершала работу, не расходуя на это никакой энергии.

Уравнение первого начала термодинамики является энергетическим балансом рабочего тела, участвующего в термодинамическом процессе. Оно может быть записано (как для 1кг вещества, так и для произвольного его количества) в форме, где связаны между собой количество теплоты, участвующее в процессе, работа, совершаемая рабочим телом против внешних сил и изменение внутренней энергии рабочего тела в процессе, а также в форме, где связаны между собой количество теплоты, изменение энталпии и располагаемая работа.

Второе начало термодинамики определяет направление, в котором протекают термодинамические процессы, устанавливает условия преобразования количеств теплоты в механическую работу, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

Согласно второму началу термодинамики нельзя создать «вечный двигатель 2-го рода», т.е. тепловую машину, которая бы в течении длительного

времени совершила бы непрерывную работу при условии перехода в получаемую работу всего количества теплоты, подводимого к рабочему телу. Необходимо освоить и другие трактовки второго начала термодинамики, которые сложились в период формирования изучаемой дисциплины и связать их с аналитическим выражением второго начала термодинамики.

Специальный раздел курса посвящен водяному пару. Изучение его свойств и связанных с ним расчетов тем более важно, т. к. водяной пар используется как рабочее тело в теплосиловых установках, а также как теплоноситель в промышленной теплотехнике.

Изучение свойств воды и водяного пара проводится с помощью $P-v$ диаграммы. Следует внимательно рассмотреть процесс парообразования, уяснить основные состояния воды и водяного пара, при этом выделяются основные состояния водяного пара: влажный насыщенный пар, сухой насыщенный пар, перегретый пар. Очень важно научиться пользоваться таблицами воды и водяного пара для определения соответствующих параметров состояния. Практические задачи, связанные с расчетом процессов с водяным паром решаются с помощью $h-s$ диаграммы, на плоскости которой нанесены семейства изобар, изохор, изотерм и линии $x=const$, включая $x=1$.

Внутренняя энергия определяется по формуле $u=h-Pv$.

В теплотехнике многие расчеты связаны с влажным воздухом, который представляет собой механическую смесь сухого воздуха и водяного пара. Важно рассмотреть возможные состояния водяного пара в воздухе в $P-v$ координатах. Необходимо понять, почему влажный воздух, несмотря на присутствие в нем водяного пара, рассчитывается как идеальный газ. Важными являются понятия влагосодержания воздуха d , абсолютной влажности воздуха ρ , относительной влажности φ . Расчеты процессов изменения состояния влажного воздуха обычно осуществляют помощью $h-d$ диаграммы.

При изучении процесса истечения газа (пара) следует разобрать обоснование и методику определения скорости истечения, расхода газа (пара) через сопло, размера расчетного сечения соплового устройства. Следует понять закономерности истечения газа (пара) из суживающихся сопел, а также из комбинированного сопла Лаваля.

В курсе технической термодинамики подробно рассматривается процесс сжатия газообразного рабочего тела в поршневом компрессоре. При этом анализируется возможность и целесообразность сжатия идеального газа по изотерме, адиабате и политропе. Необходимо понять причины, вызывающие необходимость создания многоступенчатых компрессоров. Следует разобрать методику определения мощности привода компрессора.

Из курса технической термодинамики следует, что непрерывно теплота превращается в работу в результате кругового термодинамического процесса или цикла, осуществляемого в тепловых двигателях. Циклы включают процессы расширения и сжатия рабочего тела, процессы с подводом теплоты и процессы с отводом теплоты. Процессы, из которых складываются циклы в теоретическом курсе – рассматриваются как равновесные и обратимые.

Циклы, в которых работа расширения по абсолютному значению больше работы, затрачиваемой на сжатие, являются циклами тепловых двигателей (прямые циклы). Циклы, в которых работа сжатия по абсолютной величине больше, чем работа расширения, являются циклами холодильных машин или тепловых насосов (обратные циклы).

Необходимо освоить графическое изображение прямых и обратных циклов в координатах Pv и Ts ; понимать значение площадей, получающихся при построении циклов в этих координатах.

Необходимо разобрать принципиальные схемы тепловых машин.

Следует разобрать прямой и обратный циклы Карно, циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с подводом теплоты при $P=const$, с подводом теплоты при $v=const$ и при комбинированном способе подвода теплоты, циклы газотурбинных установок (ГТУ) при разных условиях подвода теплоты, холодильных машин и теплового насоса.

Следует детально изучить теоретический цикл паросиловой установки – цикл Ренкина, в том числе графическое изображение его в Pv , Ts и hs координатах.

Необходимо разобрать вывод формул для определения термического КПД цикла паросиловой установки и удельных расходов пара и тепла для выработки единицы энергии при осуществлении энергетического цикла. Необходимо обратить внимание на способы повышения тепловой эффективности цикла Ренкина.

Существенное значение при освоении этого материала имеет рассмотрение принципиальных схем и тепловых балансов конденсационной тепловой электрической станции (ТЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Необходимо понять основные принципы теплофикации.

При рассмотрении циклов холодильных машин следует освоить понятие холодильного коэффициента, а при изучении цикла теплового насоса следует освоить понятие отопительного коэффициента.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ.

Задача №1.

Расчет газовой смеси.

Газовая смесь состоит из нескольких компонентов, содержание которых в смеси задано в процентах по объему (табл. 1).

Определить: 1) кажущуюся молекулярную массу смеси; 2) газовую постоянную смеси; 3) средние мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси при постоянном давлении в пределах температур от t_1 до t_2 (табл.2).

При решении этой задачи и последующих задач для всех исходных и итоговых величин, кроме относительных, безразмерных величин, должны быть указаны единицы измерения.

В конце задачи следует ответить письменно на следующие вопросы:

1. Что называется удельной газовой постоянной? Единица ее измерения в системе СИ. Чем она отличается от универсальной газовой постоянной?
2. Что представляют собой массовая, объемная и мольная теплоемкости. Каковы единицы их измерения в системе СИ. Какова связь между указанными теплоемкостями.
3. Какие факторы влияют на величину теплоемкости.

Таблица 1.

Последняя цифра шифра	Компоненты смеси, % по объему			
	CO ₂	O ₂	N ₂	CO
1	20	5	75	-
2	18	4	78	-
3	14	3	83	-
4	8	10	82	-
5	18	-	72	10
6	12	-	74	14
7	10	-	60	30
8	24	-	50	26
9	20	-	52	28
0	32	-	50	18

Таблица 2.

Показатели	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура Смеси: Начальная t_1 , °C	126	366	592	818	286	456	626	918	742	1342

Конечная t_2 , $^{\circ}\text{C}$	528	926	1492	1217	1183	813	1342	1566	1643	2143
-------------------------------------	-----	-----	------	------	------	-----	------	------	------	------

Литература: [2, С. 27-32, 62-73]; [4, С. 30-38, 39-56].

Таблицы теплоемкостей газов указаны в приложении данного методического указания.

Задача №2.

Расчет политропного процесса сжатия газовой смеси в компрессоре.

Рабочее тело – газовая смесь, имеющая тот же состав, что и в задаче №1 (в процентах по объему). Первоначальный объем, занимаемый газовой смесью, - V_1 (табл. 3). Начальные параметры состояния: давление $p_1 = 0,1$ Мпа, температура $t_1 = 27^{\circ}\text{C}$. Процесс сжатия происходит при показателе политропы n . Давление смеси в конце сжатия P_2 , Мпа. (Табл. 3).

Определить: 1) массу газовой смеси; 2) уд. объемы смеси в начале и в конце процесса; 3) объем, занимаемый смесью в конце процесса; 4) температуру газовой смеси в конце процесса; 5) работу сжатия в процессе; 6) работу, затрачиваемую на привод компрессора; 7) изменение внутренней энергии газовой смеси; 8) массовую теплоемкость рабочего тела в данном процессе; 9) количество теплоты, участвующего в процессе; 10) изменение энтропии в процессе.

Таблица 3.

Показатели	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Объем смеси V_1 , м^3	5	10	15	25	40	50	70	90	100	120
Показатель политропы n	1,1	1,2	1,17	1,16	1,22	1,18	1,15	1,17	1,13	1,14
Давление P_2 , Мпа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4

Построить (в масштабе) рассмотренный процесс в координатах $p-v$ и $T-s$.

Необходимые для решения задачи теплоемкости компонентов газовой смеси принять независимыми от температуры. Значения теплоемкостей газов можно принять при температуре равной 0°C из приложения данного методического указания.

Газовую постоянную смеси взять из решения задачи №1.

Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

1. В каких пределах может изменяться показатель политропного процесса?
 2. В каких пределах может изменяться теплоемкость рабочего тела в политропном процессе?
 3. Как выглядит уравнение 1-го закона термодинамики применительно к рассмотренному в задаче процессу?
 4. Как зависит работа, затрачиваемая на привод компрессора, от показателя политропы n , почему?
- Литература: [2, С. 56-57, 88-94]; [4, С. 57-61, 102-116].

Задача №3.

Расчет цикла Карно применительно к тепловому двигателю.

Рабочее тело в цикле Карно – 1 кг сухого воздуха. Предельные температуры рабочего тела в цикле: наибольшая t_1 , наименьшая t_3 (табл. 4). Предельные давления рабочего тела в цикле: наибольшее p_1 , наименьшее p_3 (табл. 4).

Таблица 4.

Показатели	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура Воздуха, $^{\circ}\text{C}$										
t_1	200	300	250	205	270	310	260	310	330	270
t_3	15	18	20	17	21	25	23	19	25	16
Давление, Мпа	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	2	2,8	3	2,5	4	4,2	3,5	2,5	4,8	3
p_1	0,16	0,1	0,15	0,12	0,12	0,1	0,11	0,13	0,14	0,17
p_3					5					

Определить: 1) основные параметры рабочего тела в характерных точках цикла; 2) количество теплоты, подведенное в цикле; 3) количество теплоты, отведенное в цикле; 4) полезную работу, совершенную рабочим телом за цикл; 5) термический КПД цикла; 6) изменение энтропии в изотермических процессах цикла.

Построить цикл (в масштабе) в координатах $p-v$ и $T-s$.

Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

1. Из каких процессов состоит цикл Карно?
2. Что показывает термический КПД цикла теплового двигателя?

- В какой диаграмме и какой площадью можно проиллюстрировать полезную работу, совершающуюся рабочим телом в цикле?
 - В какой диаграмме и какой площадью можно проиллюстрировать количество теплоты, участвующее в процессе?
- Литература: [2, С. 99-101, 88-94]; [4, С. 136, 149-152].

Задача №4.

Расчет процесса адиабатического расширения водяного пара.

Рабочее тело – водяной пар, имеющий в начальном состоянии давление p_1 и температуру t_1 (табл. 5). Масса рабочего тела – M (табл. 5). Пар расширяется до давления p_2 (табл. 5).

Схематически построить процесс адиабатического расширения водяного пара в диаграмме $h-s$.

Таблица 5.

Показатели	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Температура t_1 , $^{\circ}\text{C}$	300	400	320	370	450	520	500	380	430	530
Давление (абс.) p_1 , Мпа	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Масса M , кг	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление (абс.) p_2 , Мпа	5	3	7	8	10	12	16	15	20	25
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02
	3	4	5	6	7	8	9	0	5	0

Определить: 1) уд. объем и энталпию пара в начальном состоянии; 2) температуру, уд. объем, степень сухости и энталпию пара в конечном состоянии; 3) значения внутренней энергии пара до и после расширения; 4) работу расширения пара в адиабатном процессе.

К решению задачи приложить схему построения процесса в координатах $h-s$. Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

- Каковы особенности адиабатного процесса?
- Какой пар называется сухим, влажным, перегретым?
- В каком состоянии водяной пар находится в начале процесса?
- В какое состояние пар перешел в конце процесса?
- Каков физический смысл энталпии водяного пара в данном, конкретном состоянии?

Литература: [2, С. 169-171, 173-179]; [4, С. 136, 179-217].

Задача №5.

Определение технико-экономических показателей теоретического цикла Ренкина.

Паротурбинная установка работает по теоретическому циклу Ренкина. Давление и температура водяного пара на выходе из парогенератора (перед турбиной): p_1 и t_1 ; давление пара после турбины (в конденсаторе) p_2 .

Определить термический коэффициент полезного действия цикла η_t и теоретический удельный расход пара d , кг/(кВт·ч) при следующих условиях работы установки:

I - p_1 , t_1 и p_2 . (все параметры взять из табл. 6);

II - p_1 , t_1 (табл. 6); p_2 (табл. 7);

III - p_1 , t_1 и p_2 . (все параметры взять из табл. 7).

Сделать вывод о влиянии уровня начальных параметров состояния пара и давления пара после турбины на значения термического КПД цикла Ренкина и удельного расхода пара.

К решению задачи приложить принципиальную схему паротурбинной установки, изображение цикла Ренкина в координатах $p-v$ и $T-s$, также изображение процесса расширения пара в турбине в диаграмме $h-s$.

Таблица 6.

Показатели	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Начальное давление P_1 , Мпа	0,5	0,8	1,2	1,6	2,5	3	4	2,9	3,5	5
Температура t_1 , $^{\circ}\text{C}$	200	220	300	350	370	375	350	320	390	400
Конечное давление P_2 , Мпа	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

13

Таблица 7.

Показатели	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Начальное давление P_1 , Мпа	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Температура t_1 , $^{\circ}\text{C}$	420	450	470	490	510	520	540	550	560	600
Конечное давление P_2 , Мпа	0,05	0,02	0,01	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,003	0,002

Литература: [2, С. 270-275]; [4, С. 239-245, 252-255].

Задача №6.

Определение скорости истечения водяного пара из сопловых устройств.

Определить теоретическую скорость истечения водяного пара из суживающегося сопла и из сопла Лаваля. Начальные давление и температура пара: p_1 и t_1 (табл. 8). Давление среды, в которую происходит истечение пара, p_2 (табл. 8).

Таблица 8.

Показатели	Последняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Давление (абс.) p_1 , Мпа	0,8	1,6	3	3,5	5	8	10	7	6	4
Температура t_1 , $^{\circ}\text{C}$	220	350	375	390	400	420	450	370	350	325
Давление p_2 , Мпа	Предпоследняя цифра шифра									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	0,00 5	0,01	0,05	0,02	0,04	0,00 3	0,03	0,04	0,00 8	0,01

К решению задачи приложить изображения адиабатных процессов истечения пара из сопловых устройств в диаграмме $h-s$.

Дать эскизы профилей суживающегося сопла и сопла Лаваля.

Ответить в письменном виде на следующие вопросы:

1. При каких условиях возникает критическая скорость истечения газа (пара)?
2. Дать характеристику скорости истечения газа (пара) из суживающегося сопла при $p_2 > p_{2\text{кр}}$
3. Дать характеристику скорости истечения газа (пара) из суживающегося сопла при $p_2 \leq p_{2\text{кр}}$
4. Дать характеристику скорости истечения газа (пара) из сопла Лаваля при $p_2 < p_{2\text{кр}}$

Литература: [2, С. 193-197]; [4, С. 218-222, 230-231].

ПРИЛОЖЕНИЯ

Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном давлении
 C_p , кДж/(кг·К)

t , $^{\circ}\text{C}$	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	Воздух (абсолютн)

							о сухой)
0	0,9148	1,0304	1,0396	0,8148	1,8594	0,607	1,0036
100	0,9232	1,0316	1,0417	0,8658	1,8728	0,636	1,0061
200	0,9353	1,0346	1,0463	0,9102	1,8937	0,662	1,0115
300	0,9500	1,0400	1,0538	0,9487	1,9192	0,687	1,0191
400	0,9651	1,0475	1,0634	0,9826	1,9477	0,708	1,0283
500	0,9793	1,0567	1,0748	1,0128	1,9778	0,724	1,0387
600	0,9927	1,0668	1,0861	1,0396	2,0092	0,737	1,0496
700	1,0048	1,0777	1,0978	1,0639	2,0419	0,754	1,0605
800	1,0157	1,0881	1,1091	1,0852	2,0754	0,762	1,0710
900	1,0258	1,0982	1,1200	1,1045	2,1097	0,775	1,0815
1000	1,0350	1,1078	1,1304	1,1225	2,1436	0,783	1,0907
1100	1,0434	1,1170	1,1401	1,1384	2,1771	0,791	1,0999
1200	1,0509	1,1258	1,4493	1,1530	2,2106	0,795	1,1082
1300	1,0580	1,1342	1,1577	1,1660	2,2429	-	1,1166
1400	1,0647	1,1422	1,1656	1,1782	2,2743	-	1,1242
1500	1,0714	1,1497	1,1731	1,1895	2,3048	-	1,1313
1600	1,0773	1,1564	1,1798	1,1995	2,3346	-	1,1380
1700	1,0831	1,1631	1,1865	1,2091	2,3630	-	1,1443
1800	1,0886	1,1690	1,1924	1,2179	2,3907	-	1,1501
1900	1,0940	1,1748	1,1983	1,2259	2,4166	-	1,1560
2000	1,0990	1,1803	1,2033	1,2334	2,4422	-	1,1610

Средняя массовая теплоемкость газов при постоянном объеме
 C_V , кДж/(кг·К)

t, °C	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (абсолютно сухой)
0	0,6548	0,7352	0,7427	0,6259	1,3980	0,477	0,7164
100	0,6632	0,7365	0,7448	0,6770	1,4114	0,507	0,7193
200	0,6753	0,7394	0,7494	0,7214	1,4323	0,532	0,7243
300	0,6900	0,7448	0,7570	0,7599	1,4574	0,557	0,7319
400	0,7015	0,7524	0,7666	0,7938	1,4863	0,578	0,7415
500	0,7193	0,7616	0,7775	0,8240	1,5160	0,595	0,7519
600	0,7827	0,7716	0,7892	0,8508	1,5474	0,607	0,7624
700	0,7448	0,7821	0,8009	0,8746	1,5805	0,624	0,7733
800	0,7557	0,7926	0,8122	0,8964	1,6140	0,632	0,7842

900	0,7658	0,8030	0,8231	0,9157	1,6483	0,645	0,7942
1000	0,7750	0,8127	0,8336	0,9332	1,6823	0,653	0,8039
1100	0,7834	0,8219	0,8432	0,9496	1,7158	0,662	0,8127
1200	0,7913	0,8307	0,8566	0,9638	1,7488	0,666	0,8215
1300	0,7984	0,8390	0,8608	0,9772	1,7815	-	0,8294
1400	0,8051	0,8470	0,8688	0,9893	1,8129	-	0,8369
1500	0,8114	0,8541	0,8763	1,0006	1,8434	-	0,8441
1600	0,8173	0,8612	0,8830	1,0107	1,8728	-	0,8508
1700	0,8231	0,8675	0,8893	1,0203	1,9016	-	0,8570
1800	0,8286	0,8738	0,8956	1,0291	1,9293	-	0,8633
1900	0,8340	0,8792	0,9014	1,0371	1,9552	-	0,8688
2000	0,8390	0,8847	0,9064	1,0446	1,9804	-	0,8742

Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном давлении
 C_p , кДж/(м³·К)

t, °C	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (абсолютно сухой)
0	1,3059	1,2946	1,2992	1,5998	1,493	1,733	1,2971
100	1,3176	1,2958	1,3017	1,7003	1,502	1,813	1,3004
200	1,3352	1,2996	1,3071	1,7873	1,5223	1,888	1,3071
300	1,3561	1,3067	1,3167	1,8627	1,5424	1,955	1,3172
400	1,3775	1,3163	1,3289	1,9297	1,5654	2,018	1,3289
500	1,3980	1,3276	1,3427	1,9887	1,5897	2,068	1,3427
600	1,4168	1,3402	1,3574	2,0411	1,6148	2,114	1,3565
700	1,4344	1,3536	1,3720	2,0884	1,6412	2,152	1,3708
800	1,4499	1,3670	1,3862	2,1311	1,6680	2,181	1,3842
900	1,4645	1,3796	1,3396	2,1692	1,6957	2,215	1,3976
1000	1,4775	1,3917	1,4126	2,2035	1,7229	2,236	1,4097

1100	1,4892	1,4034	1,4248	2,2349	1,7501	2,261	1,4214
1200	1,5005	1,4143	1,4361	2,2638	1,7769	2,278	1,4327
1300	1,5106	1,4252	1,4465	2,2898	1,8028	-	1,4432
1400	1,5202	1,4348	1,4566	2,3136	1,8280	-	1,4528
1500	1,5294	1,4440	1,4658	2,3354	1,8527	-	1,4620
1600	1,5378	1,4528	1,4746	2,3555	1,8761	-	1,4708
1700	1,5462	1,4612	1,4825	2,3743	1,8996	-	1,4867
1800	1,5541	1,4687	1,4901	2,3915	1,9213	-	1,4867
1900	1,5617	1,4758	1,4972	2,4074	1,9423	-	1,4939
2000	1,5692	1,4825	1,5039	2,4221	1,9628	-	1,5010

Средняя объемная теплоемкость газов при постоянном объеме
 C_v , кДж/(м³·К)

T, °C	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (абсолютно сухой)
0	0,9349	0,9236	0,9282	1,2288	1,1237	1,361	0,9261
100	0,9466	0,9249	0,9307	1,3293	1,1342	1,440	0,9295
200	0,9642	0,9286	0,9362	1,4164	1,1514	1,516	0,9362
300	0,9852	0,9357	0,9458	1,4918	1,1715	1,587	0,9462
400	1,0065	0,9454	0,9579	1,5587	1,1945	1,645	0,9579
500	1,0270	0,9567	0,9718	1,6178	1,2188	1,700	0,9718
600	1,0459	0,9692	0,9864	1,6701	1,2439	1,742	0,9856
700	1,0634	0,9826	1,0011	1,7174	1,2703	1,779	0,9998
800	1,0789	0,9960	1,0153	1,7601	1,2971	1,813	1,0132
900	1,0936	1,0086	1,0287	1,7982	1,3247	1,842	1,0262
1000	1,1066	1,0207	1,0417	1,8326	1,3519	1,867	1,0387
1100	1,1183	1,0325	1,0538	1,8640	1,3791	1,888	1,0505

1200	1,1296	1,0434	1,0651	1,8929	1,4059	1,905	1,0618
1300	1,1396	1,0542	1,0756	1,9188	1,4319	-	1,0722
1400	1,1493	1,0639	1,0856	1,9427	1,4570	-	1,0819
1500	1,1585	1,0731	1,0948	1,9644	1,4817	-	1,0911
1600	1,1669	1,0819	1,1036	1,9845	1,5052	-	1,0999
1700	1,1752	1,0902	1,1116	2,0034	1,5286	-	1,1078
1800	1,1832	1,0978	1,1191	2,0205	1,5504	-	1,1158
1900	1,1907	1,1049	1,1262	2,0365	1,5713	-	1,1229
2000	1,1978	1,1116	1,1329	2,0511	1,5918	-	1,1296

Средняя молярная теплоемкость газов при постоянном давлении
 μC_p , кДж/(кмоль·К)

T, °C	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (абсолютно сухой)
0	29,274	29,019	29,123	35,860	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,400	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,500	29,789	43,250	35,090	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,630	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,150	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,070	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,740	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	-	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	-	32,575

1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	-	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,800	42,056	-	32,967
1700	34,658	32,749	33,231	63,218	42,576	-	33,151
1800	34,834	32,917	33,402	53,504	43,070	-	33,319
1900	35,006	33,080	33,561	53,959	43,539	-	33,482
2000	35,169	33,231	33,708	54,290	43,995	-	33,641

19

9

Средняя молярная теплоемкость газов при постоянном объеме
 μC_v , кДж/(кмоль·К)

t, °C	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Воздух (абсолютно сухой)
0	20,959	20,704	20,808	27,545	25,184	30,52	20,758
100	21,223	20,733	20,863	29,797	25,426	32,52	20,838
200	21,616	20,800	20,988	31,744	25,803	34,00	20,984
300	22,085	20,972	21,202	33,440	26,260	35,55	21,206
400	22,563	21,185	21,474	34,905	26,775	36,89	21,474
500	21,019	21,449	21,784	36,258	27,315	38,06	21,780
600	23,446	21,729	22,110	37,438	27,880	39,02	22,090
700	23,835	22,027	22,437	38,498	28,474	39,90	22,408
800	24,187	22,320	22,755	39,448	29,071	40,61	22,713
900	24,510	22,609	23,061	40,302	29,693	42,28	23,006
1000	24,803	22,881	23,350	41,077	30,304	41,83	23,283
1100	25,071	23,140	23,622	41,784	30,911	42,33	23,547
1200	25,318	23,322	23,877	42,425	31,510	42,75	23,794
1300	25,548	23,626	24,112	43,007	32,092	-	24,028
1400	25,761	23,848	24,338	43,543	32,661	-	24,250
1500	25,967	24,057	24,543	44,033	33,210	-	24,459
1600	26,159	24,250	24,736	44,485	33,741	-	24,652

1700	26,343	24,434	24,916	44,903	34,261	-	24,836
1800	26,519	24,602	25,087	45,289	34,755	-	25,004
1900	26,691	24,765	25,246	45,644	35,224	-	25,167
2000	26,854	24,916	25,393	45,975	35,680	-	25,326

ЛИТЕРАТУРА

1. Кушнырев В. И. и др. Техническая термодинамика и теплопередача.
2. Нащокин В. В. Техническая теплопередача и термодинамика. – М.: Высшая школа, 1978.
3. Арнольд Л.В., Михайловский Г. А., Селиверстов В. М. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1979..
4. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. – М.: Машиностроение, 1969.
5. Теплотехника под ред. В. Н. Луканина, 2000.