

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ

Псковский государственный политехнический институт

МЕХАНИКО-МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ТЕОРИИ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Мастенков В.В.

ТЕПЛОТЕХНИКА

**Задания на контрольные работы
с методическими указаниями
для студентов-заочников специальностей**

**АВТОМОБИЛИ И АВТОМОБИЛЬНОЕ ХОЗЯЙСТВО
ИНЖЕНЕРНАЯ ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Псков – 2009

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Выполнению контрольной работы должно предшествовать тщательное изучение соответствующего раздела курса «Теплотехника». При их выполнении студент должен сначала письменно ответить на контрольные вопросы, а затем решить соответствующие задачи (контрольные вопросы и условия задач должны быть переписаны в пояснительную записку).

При подготовке к экзамену студенту рекомендуется проработать все контрольные вопросы и задачи, предложенные в заданиях.

Контрольная работа состоит из двух заданий. Первое – по разделу «Техническая термодинамика», второе – по разделу «Основы теплопередачи».

Ответы на контрольные вопросы должны быть краткими. Их необходимо сопровождать формулами, графиками, схемами и эскизами конструкций. При решении задач студент указывает, по какой формуле и в каких единицах измерения определяются величины, откуда взяты подставленные в формулу значения (если они не содержатся в условиях задачи).

При использовании таблиц, номограмм, эмпирических формул и других справочных материалов следует сделать ссылку на литературный источник.

Вычисления всех величин проводятся в развернутом виде. Если подставляемая в формулу величина определяется по какой-либо расчетной зависимости, это промежуточное вычисление подробно записывается. Обозначения величин и терминология в пояснительной записке должны соответствовать принятым в учебниках.

Решения задач нужно иллюстрировать схемами и графиками, тщательно выполненными и подклеенными к пояснительной записке в соответствующих местах. Пояснительная записка должна иметь поля для заметок рецензента. На графиках необходимо показать все нужные числовые данные (значения давления, температуры и пр.). При решении задач числовые расчеты нужно выполнять в единицах системы СИ (См. таблицу П.1 приложения).

В методических указаниях приведен пример решения и оформления типовой задачи.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплотехника: Учеб. для вузов / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2005. – 671с.: ил.**
2. **Недужий И.А., Алабовский А.Н. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища школа. Головное изд-во, 1981. – 248с.**
3. **Техническая термодинамика. Учеб. пособие для вузов / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – 3-е изд., испр. – М.: Высш. шк., 2003. – 261с.: ил.**
4. **Теплотехника / Под ред. П. Н. Сушкина. Учебник для студентов вузов. Изд. 2-е, перераб. М.: Металлургия, 1973. 479с.**
5. **Теплотехника / Под ред. Г. А. Матвеева. Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высшая школа, 1981, 480с.**
6. **Михеев М. А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1977. 344 с.**
7. **Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. Изд. 5-е. М.: Машиностроение, 1973. 344с.**
8. **Краснощеков Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. Учебное пособие для вузов. Изд. 4-е, перераб. М.: Энергия, 1980. 288 с.**
9. **Панкратов Г. П. Сборник задач по теплотехнике. Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1980. 248с.**

ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ ДЛЯ ЗАДАНИЯ №1

Задание №1	Последняя цифра шифра студента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номер контрольных вопросов	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
Номер контрольных задач	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	12	11	13	14	15	16	12	14	15	16
	21	17	18	19	20	17	18	19	20	22
	23	30	24	25	26	27	28	29	25	30

Студент выбирает номера контрольных вопросов и задач из таблицы вариантов, а числовые значения к задачам по предпоследней цифре шифра из соответствующих таблиц, которые приведены в конце задания.

ЗАДАНИЕ №1

«Техническая термодинамика»

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Напишите уравнение состояния идеального газа. Поясните физический смысл газовой постоянной. Как определяется её значение для различных газов?
2. Какова связь между массовой, мольной и объемной теплоемкостями газа? Что такое истинная и средняя теплоемкости?
3. Дайте определение внутренней энергии реального и идеального газов. Как найти изменение внутренней энергии идеального газа для любого термодинамического процесса?
4. Покажите, как определяется работа в обратимых термодинамических процессах аналитически и графически в pV -диаграмме.
5. Приведите формулировку Первого закона термодинамики. Напишите аналитическое выражение этого закона для основных термодинамических процессов.
6. Как изменяется температура газа при изобарном и адиабатном расширении? Ответ проиллюстрируйте графиками процессов в pV - и Ts -диаграммах.
7. Что такое энтальпия газа и как определяется изменение энтальпии идеального газа в каком-либо термодинамическом процессе?
8. Что называется энтропией рабочего тела? Как определяется изменение энтропии идеального газа в термодинамическом процессе?
9. Изобразите в pV - и Ts -координатах идеальной прямой цикл Карно. Дайте необходимые пояснения.
10. В чем состоит содержание Второго закона термодинамики? Приведите основные формулировки этого закона (достаточно привести две формулировки).
11. Опишите процесс парообразования в pV - и Ts -диаграммах.
12. Изобразите процесс адиабатного расширения и (условно) адиабатного дросселирования пара в is -диаграмме.
13. Дайте определение процесса истечения газов и паров. По каким формулам подсчитываются скорость и массовый расход рабочего тела при адиабатном истечении?

14. Какова сущность процесса дросселирования и каково практическое применение этого процесса? Как условно изображается процесс дросселирования в is -диаграмме?
15. Что называется влажным воздухом? Дайте определение относительной влажности воздуха, влагосодержания и температуры точки росы.
16. Опишите id -диаграмму влажного воздуха. Каковы простейшие случаи ее применения?
17. Изобразите в $p\nu$ - и Ts -диаграммах термодинамические процессы, протекающие в компрессорах. Почему изотермический процесс сжатия газа в компрессоре является энергетически выгодным?
18. Назовите теоретические циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Изобразите их в $p\nu$ - и Ts -диаграммах. Дайте необходимые пояснения.
19. От каких величин зависит термический КПД теоретического цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении? Изобразите этот цикл в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.
20. Каково влияние начальных и конечных, параметров пара на термический КПД основного цикла паросиловых установок (цикла Ренкина)? Ответ иллюстрируйте в is -диаграмме.

ЗАДАЧИ

1. В цилиндре 1 кг воздуха сжимается - в одном случае по изотерме, а в другом - по политропе со средним показателем политропы $n=1,2$ так, что объем уменьшается в e раз. Определить конечные значения температуры, давления и плотности, воздуха, а также работу, изменение энтропии в процессах сжатия. Начальные параметры: $p_1 = 750$ мм рт. ст., и t_1 . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.
2. Смесь идеальных газов заданного массового состава занимает объем V при постоянном абсолютном давлении p и температуре t . Требуется определить газовую постоянную смеси, среднюю молекулярную массу, массу смеси, объемный состав смеси, а также среднюю мольную, объемную и массовую теплоемкости смеси (при $p=\text{const}$) для интервала температур $\theta - t$.
3. Смесь идеальных газов заданного, массового состава расширяется при постоянной температуре $t = 127^\circ\text{C}$ так, что отношение конечного объема к начальному равно e . Определить газовую постоянную, конечные параметры смеси p_2 и V_2 , работу расширения, количество теплоты и изменение удельной энтропии в процессе. Для смеси заданы масса G и начальное абсолютное давление p_1 . Процесс изобразить в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.
4. Требуется найти объемный состав смеси идеальных газов, заданный массовыми долями. Определить также парциальные давления компонентов смеси, если абсолютное давление смеси p .
5. В процессе политропного сжатия воздуха G , кг/с, в одноступенчатом поршневом компрессоре отводится теплота в количестве Q , кДж/с. При сжатии от начального абсолютного давления 0,1 МПа температура воздуха возрастает от 15°C до t_2 . Определить показатель политропы процесса сжатия, конечное давление, затраченную работу, а также изменение в процессе удельной энтропии газа.
6. Определить показатель политропы сжатия воздуха в одноступенчатом поршневом компрессоре, если давление в процессе возрастает в b раз, а температура газа изменяется от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до t_2 . Определить также теплоту процесса, работу процесса, изменение внутренней энергии и энтропии 1 кг газа.
7. Требуется определить количество теплоты, отдаваемое каждым килограммом отработавших газов дизеля в утилизационном котле, где газы при постоянном давлении охлаждаются от температуры t_1 до температуры t_2 . Объемный состав отработавших газов:

$$\gamma_{\text{CO}_2} = 0,08; \quad \gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0,06; \quad \gamma_{\text{O}_2} = 0,10; \quad \gamma_{\text{N}_2} = 0,76.$$

8. Диаметр цилиндров тепловозного дизеля $D = 318$ мм, ход поршней $s = 330$ мм, степень сжатия $\epsilon = 12$.

Определить теоретическую работу политропного сжатия воздуха в одном цилиндре, изменения удельных значений внутренней энергии и энтропии в процессе. Абсолютное давление воздуха в начале сжатия $p_1 = 95$ кПа, температура $t_1 = 127^\circ\text{C}$. Показатель политропы процесса сжатия n . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры.

9. Воздух, имея начальную температуру $t_1 = 27^\circ\text{C}$ и абсолютное давление p_1 , изотермически расширяется до давления $p_2 = 0,1$ МПа, а затем нагревается в изохорном процессе до тех пор, пока давление вновь не станет равным p_1 . Требуется определить удельный объем воздуха в конце изотермического расширения и температуру в конце изохорного подвода теплоты, а также изменения удельных значений внутренней энергии, энтальпии и энтропии в изохорном процессе. Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Изобразить процессы в pV - и Ts -диаграммах.

10. 1 кг азота, имея начальную температуру $t_1 = 0^\circ\text{C}$, расширяется при постоянном давлении p , при этом удельный объем его увеличивается в ϵ раз. Определить удельный объем и температуру азота в конце процесса, работу в процессе, изменения внутренней энергии и энтропии, а также подведенную теплоту. Средняя массовая теплоемкость азота имеет линейную зависимость от температуры: $c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382 t$ кДж/кг.

11. Определить параметры состояния 1 кг воздуха в конце его адиабатного расширения от давления p_1 до $p_2 = 0,1$ МПа.

Определить также работу процесса и изменение внутренней энергии воздуха. Начальная температура газа $t_1 = 27^\circ\text{C}$.

12. В установке по приготовлению дистиллированной воды для заправки системы охлаждения дизеля насыщенный пар, имея абсолютное давление p_1 и степень сухости $x = 0,95$, конденсируется и охлаждается до температуры $t = 80^\circ\text{C}$ проточной водой. Какое количество воды требуется для приготовления дистиллята в сутки в количестве G , если температурный перепад проточной воды в теплообменнике установки составляет Δt_w ? Теплообменом рабочих тел установки с окружающей средой пренебречь.

13. В закрытом сосуде объемом 10 м^3 находится влажный насыщенный водяной пар с абсолютным давлением p . В объеме пара содержится 30 кг жидкости. Определить массу парообразной фазы в сосуде и степень сухости пара.

14. Влажный насыщенный водяной пар со степенью сухости x перегревается при постоянном абсолютном давлении p до температуры t . На сколько градусов перегрет пар? Какое количество теплоты затрачивается на подсушку и перегрев пара?

15. 1 кг перегретого водяного пара, имея температуру t_1 , и энтропию s_1 , охлаждается в процессе постоянного объема до состояния, когда энтальпия пара становится равной 2500 кДж/кг. Определить состояние пара и его параметры в конце процесса, а также количество отведенной теплоты. Решение задачи иллюстрировать на is -диаграмме.

16. Влажный насыщенный водяной пар, имея начальные параметры $t_1 = 139^\circ\text{C}$ и $x = 0,94$, сжимается в процессе без теплообмена с окружающей средой. При этом объем пара уменьшается в ϵ раз. Определить состояние и параметры пара в конце процесса сжатия, а также изменение удельной энтальпии и работу 1 кг пара в процессе. Изобразить процесс в is -диаграмме

17. Какой должна быть площадь сечения отверстия предохранительного клапана парового котла, чтобы при внезапном прекращении отбора сухого насыщенного пара из него в количестве G абсолютное давление не превысило 1,4 МПа? Атмосферное давление $B = 750$ мм рт. ст. Потерей давления на мятие пара, теплообменом при прохождении отверстия и скоростью пара на входе в отверстие клапана пренебречь.

18. Определить основные размеры сопла Лавалья, через которое вытекает воздух в количестве 0,5 кг/с в среду с давлением 0,1 МПа. Начальные параметры газа: абсолютное давление p_1 и температура t_1 . Истечение считать адиабатным. Потерями энергии на трение и скоростью воздуха на входе в сопло пренебречь. Изобразить в

масштабе разрез сопла, приняв при этом угол конусности расширяющейся части равным 10° .

19. В дроссельном клапане парового двигателя водяной пар с начальными параметрами p_1 и t_1 дросселируется до давления 1 МПа, а затем адиабатно расширяется в цилиндре двигателя до давления 0,1 МПа. Определить потерю располагаемой работы пара вследствие дросселирования. Решение задачи проиллюстрировать в is -диаграмме.

20. Влажный насыщенный пар с абсолютным давлением p_1 поступает в дроссельный калориметр для определения его влажности. После дросселирования до давления $p_2=0,1$ МПа температура пара становится равной t_2 . Какова влажность пара до дросселирования? Как возрастает удельная энтропия пара в дроссельном калориметре? Решение задачи проиллюстрировать в is -диаграмме.

21. Для окисления топлива в цилиндры двигателя внутреннего сгорания всасывается 200 кг атмосферного воздуха в час при давлении $B = 745$ мм рт. ст., температуре t и относительной влажности j . Какое количество воды всасывается двигателем в час?

22. Какое количество воздуха необходимо пропустить через сушильную камеру, чтобы от материала, помещенного в нее, отвести 1 т воды? Наружный воздух при барометрическом давлении $B = 745$ мм рт. ст., имея температуру $t_1 = 10^\circ\text{C}$ и относительную влажность $j_1 = 50\%$, в калорифере подогревается до температуры t_2 , а затем воздух поступает в сушильную камеру и выходит из нее при относительной влажности $j_2 = 90\%$. Решение задачи проиллюстрировать id -диаграмме.

23. 1 кг сухого воздуха в прямом обратимом цикле Карно совершает полезную работу l_0 . Начальное абсолютное давление воздуха 10 МПа, начальная абсолютная температура 1200 К. В цикле к газу подводится теплота q_1 . Минимальное давление в цикле 0,1 МПа. Определить термический КПД и основные параметры во всех переходных точках цикла. Вычертить цикл в $p\nu$ - и Ts -координатах.

24. Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме определить степень сжатия, основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, полезную работу, подведенную и отведенную теплоту, если повышение давления в процессе сжатия b и понижение температуры в процессе отвода теплоты составляет Δt . Рабочее тело (1 кг сухого воздуха) в начальной точке цикла имеет давление 0,1 МПа и температуру 67°C . Изобразить цикл в $p\nu$ - и Ts -координатах.

25. Поршневой двигатель внутреннего сгорания работает по идеальному циклу с подводом q_1 теплоты при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, его термический КПД и полезную работу, если начальное абсолютное давление 0,1 МПа, начальная температура 80°C и степень сжатия e . Теплоемкость воздуха считать не зависящей от температуры. Рабочее тело 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в $p\nu$ - и Ts -координатах.

26. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты, а также степень сжатия, термический КПД и полезную работу, если заданы характеристики цикла I , и r . В начальной точке цикла $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 67^\circ\text{C}$. Температура в конце адиабатного процесса сжатия рабочего тела равна 600°C . Рабочее тело - 1 кг сухого воздуха. Изобразить цикл в $p\nu$ - и Ts -координатах.

27. Степень повышения давления в компрессоре газотурбинной установки (ГТУ) равна I , температура рабочего тела (для $k = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$) перед соплами турбины равна 800°C . В идеальном цикле ГТУ теплота подводится при постоянном давлении. Определить основные параметры рабочего тела в переходных точках цикла, термический КПД, удельную полезную работу цикла, а также изменение удельной энтропии в процессе подвода теплоты, приняв теплоемкость рабочего тела не зависящей от температуры. Начальные параметры цикла $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 27^\circ\text{C}$. Цикл представить в $p\nu$ - и Ts -координатах.

28. Теоретический одноступенчатый поршневой компрессор (без объема вредного пространства) имеет подачу воздуха V_1 при давлении 0,1 МПа и температуре 17°C. Определить температуру и объем воздуха в конце политропного ($n = 1,3$) процесса сжатия до абсолютного давления p_2 . Определить также теоретическую мощность привода компрессора и сравнить ее с мощностью изотермического сжатия.

29. Вычислить и показать графически зависимость термического КПД цикла Ренкина паросиловой установки от начальной температуры пара, приняв ее равной 400, 450, 500, 550 и 600°C при одинаковых значениях начального абсолютного p_1 и конечного $p_2 = 5$ кПа давления. Показать также влияние повышения начальной температуры пара в цикле на изменение степени влажности пара, выходящего из парового двигателя. Решение задачи проиллюстрировать на is -диаграмме.

30. Определить, как при понижении начального давления путем дросселирования изменятся располагаемый теплоперепад и термический КПД цикла Ренкина паросиловой установки, если начальное абсолютное давление пара p_1 температура t_1 , а давление в конденсаторе установки 5 кПа. Давление, до которого дросселируется пар, равно p_2 . Решение задачи проиллюстрировать на is -диаграмме.

Таблица Числовые данные к задачам задания №1

№№ задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	e	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	$t_1, ^\circ\text{C}$	47	40	37	30	27	20	17	10	7	0
2	Массовый состав смеси; %										
	CO ₂	18	14	10	17	10	15	12	16	13	18
	H ₂ O	1	15	6	5	4	7	14	7	12	10
	N ₂	65	45	76	70	80	60	47	62	54	46
	O ₂	16	26	8	8	6	18	27	15	21	26
	$V, \text{ м}^3$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$p, \text{ МПа}$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
$t, ^\circ\text{C}$	200	300	400	500	600	600	500	400	300	200	
3	Массовый состав смеси; %										
	CO ₂	18	14	10	17	10	15	12	16	13	18
	H ₂ O	1	15	6	5	4	7	14	7	12	10
	N ₂	65	45	76	70	80	60	47	62	54	46
	O ₂	16	26	8	8	6	18	27	15	21	26
	e	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$G, \text{ кг}$	20	19	18	17	16	15	14	13	12	10
$p_1, \text{ МПа}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	
4	Массовый состав смеси; %										
	CO ₂	18	14	10	17	10	15	12	16	13	18
	H ₂ O	1	15	6	5	4	7	14	7	12	10
	N ₂	65	45	76	70	80	60	47	62	54	46
	O ₂	16	26	8	8	6	18	27	15	21	26
	$p, \text{ МПа}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Продолжение таблицы

№№ задач	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
5	$10^3 G$, кг/с	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
	Q , кДж/с	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,55	1,6	1,65	1,7
	t_2 , °С	120	115	110	105	100	95	90	85	80	75
6	b	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5
	t_2 , °С	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
7	t_1 , °С	410	420	430	440	450	460	470	480	490	500
	t_2 , °С	230	235	240	245	250	260	270	280	290	300
8	n	1,22	1,24	1,26	1,28	1,3	1,29	1,27	1,25	1,23	1,2
9	p , МПа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
10	p , МПа	7	6	5	4	3	2	1	0,8	0,6	0,5
	e	2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
11	p_1 , МПа	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5
12	p , МПа	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,35	0,4
	G , т/сут	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
	Δt_w , К	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
13	p , МПа	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8
14	x	0,91	0,9	0,92	0,94	0,96	0,98	0,96	0,94	0,92	0,9
	p , МПа	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	7,0	10,0
	t , °С	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
15	t_1 , °С	270	480	290	320	400	530	420	500	520	560
	s_1 , кДж/(кг*К)	7,7	8,2	7,4	7,5	7,7	8,0	7,3	7,5	6,7	7,3
16	e	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15
17	G , кг/с	0,7	1,1	1,8	2,8	5,5	0,6	1,0	1,7	2,5	5
18	p_1 , МПа	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	1,1	1,2	1,3
	t_1 , °С	200	220	240	260	280	300	320	340	460	480
19	p_1 , МПа	5,0	5,0	4,0	4,0	3,5	3,5	3,0	3,0	2,0	2,0
	t_1 , °С	300	350	400	350	300	350	400	350	300	400
20	p_1 , МПа	1,6	1,2	1,3	1,4	2,0	1,5	1,0	0,8	0,7	0,6
	t_2 , °С	140	131	121	115	110	118	120	125	122	110
21	t , °С	12	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	j , %	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45
22	t_2 , °С	60	62	64	66	68	70	72	74	76	80
23	q_1 , кДж/кг	30	31	32	33	34	35	34	33	32	30
	l_0 , кДж/кг	20	20	20	22	24	25	26	23	21	21
24	b	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5
	Δt , К	300	310	320	330	340	350	360	370	380	390
25	q_1 , кДж/кг	1000	950	900	850	800	750	700	650	650	600
	e	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5
26	l	2,2	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3
	r	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,5	1,5	1,5
27	l	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8
28	V_1 , м ³ /МИН	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
	p_2 , бар.	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0
29	p_1 , бар.	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
30	p_1 , бар.	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
	t_1 , °С	400	420	440	460	480	500	520	540	560	580
	p_2 , бар.	10	10	10	15	15	20	20	30	40	50

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ №1

Задачи 1-11

Задачи составлены по следующим разделам технической термодинамики: *уравнение состояния идеального газа, смесь идеальных газов, теплоемкость, первый закон термодинамики и основные термодинамические процессы.*

При решении этих задач могут быть использованы следующие формулы и выражения.

Уравнение состояния идеального газа: $p\nu = RT$ (для 1 кг газа)

Или $pV = GRT$ (для G кг газа),

где $R = \frac{8314}{m}$ - газовая постоянная, Дж/(кг*К); m - масса 1 кмоль газа, кг (численно равна молекулярной массе газа).

Для газовых смесей вводят понятие о так называемой средней (кажущейся) молекулярной массе смеси, значение которой определяется по выражениям:

через объемные доли $m_{см} = \sum_{i=1}^n r_i m_i$ и через массовые доли $m_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{m}}$,

где m_i - молекулярная масса компонента, входящего в смесь;

$m_i = \frac{G_i}{G}$ - массовая доля газа в смеси (отношение массы этого газа, входящего в смесь, к массе всей смеси);

$r_i = \frac{V_i}{V}$ - объемная доля (отношение приведенного объема какого-либо газа, входящего в смесь, к объему всей смеси).

Формулы пересчета состава смеси:

$$r_i = \frac{m_i m_{см}}{m}; \quad m_i = \frac{r_i m_i}{m_{см}}$$

Газовую постоянную смеси идеальных газов R можно определить или через газовые постоянные отдельных компонентов R_i , входящих в смесь $R = \sum_{i=1}^n m_i R_i$, или через

среднюю молекулярную массу смеси $R = \frac{8314}{m_{см}}$, Дж/(кг*К).

Для определения парциального давления отдельного компонента p_i , входящего в смесь, служат формулы:

$$p_i = r_i p \quad \text{и} \quad p_i = m_i \frac{R_i}{R} p,$$

где p - общее давление смеси газов.

В зависимости от выбранной количественной единицы вещества различают молярную теплоемкость m_c , кДж/(кмоль*К), массовую - c , кДж/(кг*К) и объемную - c' , кДж/(м³*К). Объемную теплоемкость относят к 1м³ при нормальных условиях ($p_0 = 760$ мм рт. ст., $t_0 = 0^\circ\text{C}$). Эти теплоемкости между собой связаны следующими зависимостями:

$$c = \frac{mc}{m} = \frac{c'}{r_0} \quad \text{и} \quad c' = \frac{mc}{22,4} = cr_0,$$

где m - молекулярная масса газа;

r_0 - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³.

Мольная массовая и объемная теплоемкости могут быть при постоянном давлении c_p и при постоянном объеме c_v . Разность массовых теплоемкостей при постоянном объеме равна газовой постоянной: $c_p - c_v = R$ (уравнение Майера).

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме обозначают буквой k (показатель адиабаты), т.е. $k = \frac{mc_p}{mc_v} = \frac{c_p}{c_v}$. Следовательно:

$$c_v = \frac{R}{k-1} \quad \text{и} \quad c_p = kc_v.$$

Теплоемкость газа зависит от его температуры. В приближенных расчетах часто пренебрегают этой зависимостью, т.е. теплоемкость газов одинаковой атомности считают величиной постоянной. Значения мольных теплоемкостей и показатель адиабаты приведены в таблице:

Газы	Теплоемкость, кДж/(кмоль*К)		k
	mc_v	mc_p	
Одноатомные	12,56	20,93	1,67
Двухатомные	20,93	29,31	1,40
Трех- и многоатомные	29,31	37,68	1,29

Зависимость теплоемкости газов от температуры имеет нелинейный характер. В таблице П.3 приложения приведены средние мольные теплоемкости некоторых газов при постоянном давлении в пределах от 0°С до t . При пользовании таблицей в необходимых случаях необходима интерполяция.

Для смесей идеальных газов массовая, объемная и мольная теплоемкости определяются соответственно по выражениям:

$$c_{cm} = \sum_1^n m_i c_i, \quad c'_{cm} = \sum_1^n r_i c'_i, \quad mc_{cm} = \sum_1^n r_i mc_i,$$

Для нахождения средней мольной теплоемкости в пределах температур от t_1 до t_2 надо из соответствующей таблицы взять теплоемкость mc_{m1} и mc_{m2} - соответственно в пределах 0° - t_1 и 0° - t_2 (средние теплоемкости обозначаются индексом « m »). Затем по выражению $mc_m = \frac{mc_{m2}t_2 - mc_{m1}}{t_2 - t_1}$ определить искомую

теплоемкость. По аналогичным формулам определяются c и c' .

Если в процессе участвуют G кг вещества, то количество теплоты в соответствующем процессе определяется по выражению: $Q = G(c_{m2}t_2 - c_{m1}t_1)$.

В p_v -диаграмме линия, изображающая политропный процесс, имеет уравнение $pv^n = const$, где n - показатель политропы. Связь между основными параметрами рабочего тела в политропном процессе выражается следующими формулами:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Для адиабатного процесса в этих формулах показатель политропы n заменяется показателем адиабаты k .

Изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии не зависит от характера процесса и при постоянной теплоемкости для 1 кг идеального газа подсчитывается по формулам:

$$\begin{aligned} u_2 - u_1 &= c_v(t_2 - t_1); \\ i_2 - i_1 &= c_p(t_2 - t_1); \\ s_2 - s_1 &= c \ln \frac{T_2}{T_1}. \end{aligned}$$

В последнем выражении c – теплоемкость соответствующего процесса. Для политропного процесса теплоемкость определяется из выражения:

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}$$

Показатель политропы n может быть вычислен, если известны значения p и v в двух точках процесса, тогда:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n \quad \text{или} \quad \lg \frac{p_2}{p_1} = n \lg \frac{v_1}{v_2} \quad \text{откуда} \quad n = \frac{\lg p_2 - \lg p_1}{\lg v_1 - \lg v_2}$$

Характеристикой политропного процесса может быть доля теплоты j_n , идущая на изменение внутренней энергии, которая для данного процесса является постоянной величиной:

$$j_n = \frac{\Delta u}{q_n} = \frac{c_v \Delta t}{c_n \Delta t} = \frac{n-1}{n-k}$$

Зная значение j_n , можно также определить показатель политропы.

Удельная работа политропного процесса:

$$l = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

или

$$l = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

Для адиабатного процесса $n = k$, а для изобарного $n = 0$.

В адиабатном процессе удельная работа равна изменению внутренней энергии с обратным знаком:

$$l = -(u_2 - u_1) = c_v(t_1 - t_2)$$

В изотермическом процессе давление изменяется обратно пропорционально объему:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Работа этого процесса равна теплоте:

$$L = Q = GRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Изменение удельной энтропии в изотермическом процессе:

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Следует помнить, что

$$TK = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273,16,$$

но $dT = dt$, т.е. $\Delta T = \Delta t$, К.

Задачи 12 и 13

Задачи составлены по разделам термодинамики *термодинамические свойства и процессы реальных газов, паров парогазовых смесей (влажного воздуха)*.

Количество проточной воды W , которое потребуется для охлаждения G кг пара (задача 12), определится из уравнения теплового баланса:

$$G(i_x - i_{кд}) = Wc_{pm}\Delta t,$$

где энтальпия пара $i_x = i' + rx$, энтальпия конденсата (дистиллята) $i_{кд} = c_{pm}t$.

В задаче 13 по заданному давлению надо в соответствующей таблице насыщенного пара найти значения удельных объемов кипящей жидкости V' и пара V'' . Объем жидкости в сосуде: $V_{ж} = G_{ж}V'$. Масса парообразной фазы: $G_{п} = \frac{V_{п}}{v''}$.

Задачи 14 - 16

Задачи составлены по разделам термодинамики *термодинамические свойства и процессы реальных газов, паров парогазовых смесей (влажного воздуха)*.

Задачи решаются при помощи is -диаграммы водяного пара (см. приложение рис. П1), практическая часть которой состоит из двух областей. Ниже пограничной кривой сухого насыщенного пара (степень сухости $x = 1$) будет область влажного насыщенного пара ($0 < x < 1$), выше - область перегретого пара. Поэтому, когда в задаче требуется определить состояние пара, то нужно показать, в какой области диаграммы находится точка данного состояния пара. В is -диаграмме в области влажного пара соответствующие изобара и изотерма совпадают и изображаются одной линией, так как в этой области определенному давлению соответствует определенная температура насыщения. В области перегретого пара изотермы отклоняются от изобар вправо, асимптотически приближаясь к горизонтальной линии.

Удельная внутренняя энергия пара $u = i - pv$ (здесь необходимо обратить внимание на соответствие размерностей всех величин).

Удельная теплота в изобарном процессе равна изменению энтальпии в этом процессе, т. е. $q = i_2 - i_1$. В обратимом адиабатном процессе изменения состояния пара, протекающем при постоянном значении энтропии, удельная работа процесса:

$$l = u_1 - u_2 = (i_1 - p_1 v_1) - (i_2 - p_2 v_2).$$

Задачи 17-20

Задачи составлены по разделу термодинамики: *термодинамика потока газов и паров* на процессы истечения и дросселирования газов и паров. Процесс истечения принимается без теплообмена, т. е. адиабатным, для которого в указаниях к задачам 1 - 11 приведены формулы, связывающие основные параметры идеального газа, и неразрывным (сплошным), когда соблюдается равенство (уравнение неразрывности):

$$Gv=fc,$$

где G - массовый расход газа или пара, кг/с;

v - удельный объем газа или пара, м³/кг;

f - площадь данного сечения сопла, м²;

c - скорость потока в рассматриваемом сечении, м/с.

Из этого равенства можно определить массовый расход или площадь данного сечения сопла.

Если адиабатное истечение газа или пара происходит при отношении давлений $\frac{p_2}{p_1}$ больше критического $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$, то применяют суживающееся сопло. В этом случае теоретическая скорость истечения определяется по формуле, м/с:

$$c = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

В этой формуле величины p и v имеют соответствен следующие величины: Па, м³/кг. Для водяного пара скорость истечения определяют по формуле:

$$c_2 = 44,76 \sqrt{i_1 - i_2},$$

где i_1 и i_2 - соответственно энтальпии, кДж/кг, пара в начале и конце адиабатного процесса истечения, определяемые по i_s -диаграмме (рис.1).

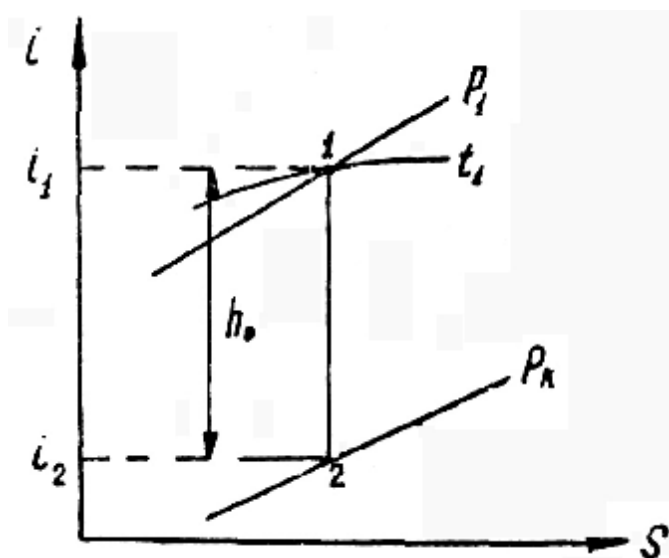


Рис.1

Критическое отношение давлений $\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$ для двухатомных газов, в том числе и для воздуха ($k = 1,4$), равно 0,528, для перегретого водяного пара - 0,546.

Если истечение происходит при $\frac{p_2}{p_1} < \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$, то применяют расширяющееся сопло

Лавалю, где скорость в выходном сечении сопла достигает сверхкритических (сверхзвуковых) значений. В этом случае скорость на выходе из сопла определяется по приведенной выше формуле, а критическая скорость в минимальном сечении для двухатомных газов по формуле:

$$c_{кр} = 1,08\sqrt{p_1 v_1}, \quad \text{или} \quad c_{кр} = 1,08\sqrt{RT_1}.$$

Для перегретого пара:

$$c_{кр} = 44,76\sqrt{i_1 - i_{кр}},$$

где $i_{кр}$ - энтальпия пара в минимальном сечении сопла в конце адиабатного процесса расширения пара до критического давления $p_{кр} = 0,546 p_1$ определяется по is -диаграмме. Площадь минимального сечения сопла Лавалю может быть определена из уравнения неразрывности потока:

$$f_{\min} = \frac{M v_{кр}}{c_{кр}},$$

где $v_{кр} = v_1 \left(\frac{p_1}{p_{кр}}\right)^{\frac{1}{k}}$ для газов. Для водяного пара величина $v_{кр}$ может быть

определена по is -диаграмме. Так как в процессе адиабатного дросселирования газа или пара энтальпия не изменяется, то линия, изображающая условно этот процесс в is -диаграмме, будет параллельна оси s .

Задачи 21-22

Задачи составлены по разделу термодинамики: *термодинамика потока газов и паров* на процессы истечения и дросселирования газов и паров.

Для решения указанных задач используется Id -диаграмма влажного воздуха. По заданным значениям t и j в задаче 21 находится влагосодержание d , т. е. сколько водяного пара содержится в 1 кг сухого воздуха, а затем количество влаги, всасываемой в цилиндр двигателя с 200 кг воздуха в час. В задаче 22 количество воздуха в кг для испарения 1 кг влаги в сушильной камере равно $\frac{1000}{d_2 - d_1}$, где d_1 и d_2 - соответственно влагосодержания в г/кг сухого воздуха на входе его в сушильную камеру и на выходе из нее.

Задачи 23-27

Задачи составлены по разделам термодинамики: *общие свойства циклов тепловых машин и анализ циклов теплосиловых установок*.

Вычерчивается цикл в pv - и Ts -диаграммах с обозначением всех переходных точек цикла. Цикл Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат. Неизвестное значение удельного объема в конце изотермического расширения может быть определено из формулы теплоты этого процесса.

Так как в теоретических циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установках процессы сжатия и расширения с понижением давления являются адиабатными, то основные параметры в точках этих процессов, могут быть определены из зависимостей между начальными и конечными параметрами адиабатного процесса (см. указания к задачам 1—11).

В задаче 25 неизвестное значение температуры в соответствующей точке процесса определяется из формулы теплоты данного процесса. В ряде точек цикла неизвестный параметр состояния рабочего тела находится из уравнения состояния идеального газа. Если в данной задаче определены термический КПД h_t и удельная полезная работа l_0 ,

то удельное количество подведенной теплоты в цикле $q_1 = \frac{l_0}{h_t}$, а отведенной -

$$q_2 = q_1 - l_0.$$

Задача 28

Задача составлена по разделу термодинамики: *нагнетание газов и паров*.

Если объем всасываемого газа – V_1 , м³, то теоретическая секундная работа (мощность) процесса политропного сжатия:

$$L_{сж} = \frac{1}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

При политропном сжатии теоретическая мощность привода компрессора в n раз больше мощности процесса сжатия.

Теоретическая работа привода компрессора при изотермическом сжатии равна работе процесса сжатия:

$$L = p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Задачи 29, 30

Задачи составлены по разделу термодинамики: *анализ циклов теплосиловых установок*.

Термический КПД теоретического паросилового цикла (цикла Ренкина):

$$h_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i'_2},$$

где i_1 - энтальпия пара в начале адиабатного процесса расширения пара в паровом двигателе (точка 1). Значение i_1 определяется по is -диаграмме по заданным начальным параметрам пара (см. рис. 1);

i_2 - энтальпия пара в конце адиабатного процесса расширения пара (точка 2 находится на пересечении линии расширения $s_1 = \text{const}$ с изобарой p_2 заданного давления в конденсаторе, рис. 1);

i'_2 - энтальпия кипящей жидкости (конденсата) при заданном давлении в конденсаторе. Значение i'_2 берется из соответствующих таблиц приложения.

Процесс дросселирования пара условно изображается линией постоянной энтальпии.

ТАБЛИЦА ВАРИАНТОВ ДЛЯ ЗАДАНИЯ №2

Задание №2	Последняя цифра шифра студента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Номер контрольных вопросов	10 20	9 19	8 18	7 17	6 16	5 15	4 14	3 13	2 12	1 11
Номер контрольных задач	1 12	2 11	3 13	4 14	5 15	6 16	7 17	8 18	9 19	10 20

Студент выбирает номера контрольных вопросов и задач из таблицы вариантов, а числовые значения к задачам по предпоследней цифре шифра из соответствующих таблиц, которые приведены в конце задания.

ЗАДАНИЕ №2

«Основы теплопередачи»

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните физическую сущность трех основных способов переноса теплоты.
2. Сформулируйте закон теплопроводности Фурье. Дайте пояснения к понятиям «плотность теплового потока» и «температурный градиент».
3. Изобразите графически характер распределения температуры по толщине плоской трехслойной стенки для стационарного теплового режима при следующих соотношениях между коэффициентами теплопроводности материала каждого слоя:

$$l_1 < l_2 < l_3;$$

$$l_1 > l_2 = l_3.$$

Напишите соответствующие соотношения для перепадов температур Δt_1 в отдельных слоях, приняв их толщины d_i одинаковыми.

4. Дайте определение коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи и теплопередачи.
5. Стенка теплообменной поверхности парового котла омывается с одной стороны горячими газами, а с другой - кипящей водой. Почему температура поверхности со стороны воды значительно меньше отличается от температуры воды, чем от температуры газов?
6. Объясните понятие термического сопротивления цилиндрической стенки и порядок его определения для многослойной стенки?
7. Какую роль играет вязкостный подслой в конвективном теплообмене при турбулентном течении жидкости около стенки?
8. В чем сущность подобия физических процессов? Приведите основные критерии теплового подобия.
9. Для определения коэффициента теплопередачи при турбулентном течении жидкости в трубах используется следующая критериальная формула:

$$Nu_{жс} = 0,021 Re_{жс}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} e_l$$

Используя указанную формулу, поясните, как изменится коэффициент теплоотдачи, если при заданном расходе теплоносителя трубу с внутренним диаметром d заменить двумя трубами вдвое меньшего диаметра. Прочие- условия оставить неизменными.

10. Для определения коэффициента теплоотдачи при ламинарном течении жидкости в каналах используется следующая критериальная формула:

$$Nu_{жс} = 0,15 Re_{жс}^{0,33} Pr_{жс}^{0,43} Gr_{жс}^{0,1} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} e_t$$

Поясните, влияние какого фактора на теплообмен учитывают в этой формуле критерии $Gr_{жс}$ и $Pr_{ст}$.

11. Среднее значение критерия Нуссельта при поперечном обтекании газами коридорного пучка труб определяется (при $Re > 4 \cdot 10^3$) по следующей критериальной формуле:

$$Nu = 0,177 Re^{0,64} C_z$$

Поясните, используя указанную формулу, каково влияние скорости и диаметра труб на средний коэффициент теплоотдачи. Что учитывает в формуле коэффициент C_z ?

12. Средний коэффициент конвективной теплоотдачи при свободном движении теплоносителя около горизонтальной трубы определяется на основании следующей критериальной зависимости:

$$Nu = 0,51 (Gr_{жс} Pr_{жс})^{0,25} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$$

Поясните критерии, входящие в указанную зависимость. Влияние какого фактора

учитывается множителем $\left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25}$? В каком виде можно представить эту

формулу для воздуха?

13. Объясните влияние отдельных факторов на коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации пара на горизонтальных и вертикальных трубах?

14. Плотность теплового потока q , Вт/м², при пузырьчатом кипении воды в большом объеме (для $p < 3 \cdot 10^6$ Па) в условиях свободной конвекции можно определить по следующей формуле:

$$q = 0,145 \Delta t^{3,33} p^{0,5},$$

где Δt - температурный напор ($\Delta t = t_n - t_{cm}$);

p - давление, Па.

Напишите формулу, связывающую коэффициент теплоотдачи a с плотностью теплового потока q и давлением p .

15. В чем заключается опасность наступления пленочного режима кипения?

16. В чем особенности излучения и поглощения лучистой энергии газами?

17. Дайте определение рекуперативного, регенеративного и смешительного теплообменников.

18. В каком случае изменение температуры греющего теплоносителя в теплообменнике будет больше, чем нагреваемого, и в каком меньше?

19. Укажите преимущества и недостатки противоточной и прямоточной схем движения теплоносителей в теплообменниках.

20. На каких основных уравнениях базируется тепловой расчет теплообменных аппаратов? В чем сущность проектного и поверочного тепловых расчетов?

ЗАДАЧИ

1. Стенка холодильника, состоящая из наружного слоя изоляционного кирпича толщиной $d_1 = 250$ мм и внутреннего слоя совелита толщиной $d_2 = 200$ мм, имеет температуру наружной поверхности t_1^{cm} и внутренней t_3^{cm} . Коэффициенты теплопроводности материала слоев соответственно равны: $\lambda_1 = 0,24$ Вт/(м*К) и $\lambda_2 = 0,09$ Вт/(м*К). Определить плотность теплового потока через стенку и температурные градиенты в отдельных слоях. Представить графически распределение температуры по толщине стенки.

2. По стальному паропроводу с внутренним диаметром d_1 и толщиной стенки $d_1 = 8$ мм протекает перегретый пар с температурой t_1 . Паропровод покрыт слоем изоляции толщиной d_2 , коэффициент теплопроводности которой $\lambda_2 = 0,1$ Вт/(м*К). Температура окружающего воздуха $t_2 = 25^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи со стороны пара и окружающего воздуха соответственно равны: $\alpha_1 = 250$ Вт/(м²*К), $\alpha_2 = 12$ Вт/(м²*К). Определить потери тепла q_l на 1 пог. м паропровода, а также температуру наружной поверхности изоляции. Коэффициент теплопроводности стали λ_1 принять равным 35 Вт/(м*К).

3. Коэффициент теплопередачи через наружное ограждение (стену) помещения k , коэффициент теплоотдачи от воздуха внутри помещения к поверхности стены α_1 . Определить на сколько градусов изменится температура внутренней поверхности стены, если температура наружного воздуха понизится на 25°C , а температура воздуха внутри помещения уменьшится на 5°C .

4. Теплопровод покрыт двумя слоями изоляции, имеющими одинаковую толщину d . Средний диаметр второго слоя d_{m2} в n раз больше среднего диаметра первого слоя d_{m1} , а коэффициент теплопроводности изоляции второго слоя в n раз меньше коэффициента теплопроводности первого слоя. На сколько процентов изменится потеря тепла (линейная плотность теплового потока q_l , Вт/пог.м), если при неизменных температурах наружной и внутренней поверхностей слоёв изоляции поменять местами?

5. До какого предельного значения можно понизить температуру воздуха в помещении, чтобы температура внутренней поверхности стены осталась не ниже t_1^{cn} при температуре наружного воздуха $t_2 = -35^\circ\text{C}$, если толщина стены $d_{ст.}$, коэффициент теплопроводности материала стены $\lambda_{ст.}$, а коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной сторон соответственно $\alpha_1 = 9$ Вт/(м²*К) и $\alpha_2 = 20$ Вт/(м²*К)?

6. По стальному неизолированному трубопроводу диаметром 80×5 мм течет холодильный агент, температура которого $t_2 = -20^\circ\text{C}$. Температура воздуха в помещении, где проходит трубопровод $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха $\alpha_1 = 10$ Вт/(м²*К), со стороны холодильного агента $\alpha_2 = 1000$ Вт/(м²*К). На сколько процентов снизится потеря холода, если трубопровод покрыть слоем изоляции с коэффициентом теплопроводности λ_2 толщиной d_2 ?

7. Определить потери тепла через кладку камеры сгорания толщиной $d_{ст.} = 0,45$ м, площадью $F = 8$ м². Кладка выполнена в виде плоской стенки из шамотного кирпича, коэффициент теплопроводности которого $\lambda_{ст.}$, Вт/(м*К), связан с температурой зависимостью $\lambda_{ст.} = 0,84 + 0,0006t$.

Температура газов в камере сгорания t_1 , температура холодного воздуха $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплоотдачи со стороны газов и воздуха соответственно α_1 и α_2 .

8. Какова толщина слоя изоляции паропровода, если при температуре внутренней ее поверхности t_1^{cm} наружная поверхность диаметром d_2 имеет температуру $t_2^{cm} = 50^\circ\text{C}$? Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda = 0,08$ Вт/(м*К). Коэффициент

теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающему воздуху $a_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Температура воздуха 20°C .

9. Плоская стальная стенка толщиной $d_{cm} = 10 \text{ мм}$ омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой $t_1 = 950^\circ\text{C}$, а с другой стороны - водой с температурой $t_2 = 250^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплопередачи со стороны газов и со стороны воды соответственно a_1 и a_2 . Коэффициент теплопроводности материала стенки $\lambda_{ст} = 50 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Определить плотность теплового потока через стенку и температуру ее поверхностей со стороны газов и воды для случая чистой стенки, а также для случая, когда она покрыта слоем накипи с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{н} = 1,4 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ толщиной $d_{н}$. Для обоих случаев показать графически распределение температуры по толщине стенки.

10. Голый металлический провод диаметром $d = 4 \text{ мм}$ имеет температуру поверхности $t_{ст} = 95^\circ\text{C}$. Активное электрическое сопротивление провода $r = 4 \cdot 10^3 \text{ Ом}/\text{м}$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности провода к окружающему воздуху a . Температура воздуха $t_{в}$. Какой будет температура поверхности этого провода $t'_{ст}$ под слоем изоляции толщиной $d = 3 \text{ мм}$ с коэффициентом теплопроводности λ , при неизменном токе и прочих равных условиях? Определить также максимальное значение тока в изолированном проводе, если первоначальную температуру провода считать предельно допустимой. Дайте объяснение полученным результатам.

11. Определить требуемые значения кинематического коэффициента вязкости ν_m и скорости течения жидкости w_m в модели, в которой исследуется теплообмен при вынужденной конвекции. Коэффициент температуропроводности жидкости в модели $a_m = 0,8 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$. В образце, представляющем собой канал с эквивалентным диаметром d_0 , протекает воздух со средней скоростью w_0 . Определяющая температура воздуха t_0 , давление $p_0 = 0,3 \text{ МПа}$. Геометрические размеры модели в шесть раз меньше размеров образца.

12. Определить значение коэффициента теплоотдачи при течении воздуха по цилиндрической трубе диаметром $d = 40 \text{ мм}$. Средняя температура воздуха $t_{в}$, давление $p = 0,3 \text{ МПа}$, расход G . Относительная длина трубы $l/d > 50$.

13. По трубе с внутренним диаметром $d = 50 \text{ мм}$ течет вода со средней скоростью w . Средняя температура воды $t_{ж}$, температура стенки трубы $t_{ст}$ постоянна. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи и количество передаваемого в единицу времени тепла (линейную плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}$), если относительная длина трубы $l/d = 10$.

14. Определить среднее значение коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании пучка коридорно расположенных труб диаметром $d = 20 \text{ мм}$, если средняя определяющая скорость воздуха в пучке w , средняя температура воздуха $t_{в}$. Какова средняя линейная плотность теплового потока в пучке q_l , если температура поверхности трубы $t_{ст}$ постоянна и равна 200°C ? Поправкой на число рядов труб пренебречь.

15. По трубе диаметром $d = 40 \text{ мм}$ движется воздух при давлении $p = 0,1 \text{ МПа}$. Расход воздуха G , температура воздуха на входе t'_g . Какой должна быть длина трубы, имеющей температуру стенки $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$, чтобы температура воздуха на выходе была t''_g ?

16. Горизонтальный трубопровод с наружным диаметром $d = 0,25 \text{ м}$, длиной $l = 20 \text{ м}$ имеет температуру поверхности $t_{ст}$, степень черноты поверхности $e_1 = 0,72$. Определить количество тепла, которое отдает трубопровод в окружающую среду излучением и конвекцией, кВт (в условиях свободного движения воздуха), если температура воздуха $t_{в} = 23^\circ\text{C}$. Как изменится суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением (отношение суммарного удельного теплового потока к разности температур поверхности и среды), если при прочих неизменных условиях путем специального покрытия уменьшить степень черноты поверхности до e_2 ?

17. Для измерения температуры движущегося с относительно небольшой скоростью горячего воздуха в канале установлена термопара, показание которой t_t . Какова действительная температура воздуха, если коэффициент теплоотдачи от потока воздуха к спая a , степень черноты спая $e = 0,82$, а температура стенок канала $t_{ст}$?

18. Определить температуру поверхности трубы с наружным диаметром d , если линейная плотность результирующего потока излучением от нее составляет q_l , а интегральная степень черноты поверхности e . Температура окружающего воздуха $t_b = 17^\circ\text{C}$.

19. Определить плотность теплового потока через плоскую стенку нагревательной печи, состоящую из двух слоев кладки: шамотного кирпича толщиной $d_1 = 0,56$ м и диатомитового кирпича $d_2 = 0,24$ м, если температура внутренней поверхности кладки равна t_1^{cm} , а температура наружного воздуха $t_0 = 25^\circ\text{C}$. Коэффициент теплопроводности внутреннего слоя кладки $l_1 = 0,95$ Вт/(м*К), наружного слоя $l_2 = 0,15$ Вт/(м*К). Коэффициент теплоотдачи конвекцией со стороны наружной поверхности $a_k = 8,5$ Вт/(м²*К), а ее степень черноты e .

20. Средняя температура поверхности токоведущей шины равна $t_{ст}$, а ее интегральная степень черноты e .

Температура окружающего воздуха $t_b = 20^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи конвекцией связан с температурой поверхности $t_{ст}$ соотношением:

$$a_k = 2,65(t_{cm} - t_b)^{0,25}$$

В результате покрытия шин тонким слоем лака интегральная степень черноты поверхности стала равна $e' = 0,9$. Какова теперь будет средняя температура поверхности шин $t'_{ст}$ при том же значении тока и прочих неизменных условиях?

Таблица Числовые данные к задачам задания №2

Задача	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	$t_1^{cm}, ^\circ\text{C}$	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
	$t_3^{cm}, ^\circ\text{C}$	- 8	- 7	- 6	- 5	- 4	- 3	- 2	- 1	0	0
2	$d_1, \text{мм}$	250	240	230	220	210	200	190	180	170	160
	$d_2, \text{мм}$	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60
	$t_1, ^\circ\text{C}$	450	440	430	420	410	400	350	300	250	200
3	$k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	0,80	0,90	0,94	1,00	1,20	1,24	1,30	1,34	1,40	1,60
	$a_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	6,9	7,2	7,6	8,0	9,6	10,0	10,4	10,8	11,2	12,8
4	n	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3
5	$t_1^{cm}, ^\circ\text{C}$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	$d_{ст}, \text{м}$	0,37	0,41	0,40	0,50	0,30	0,42	0,48	0,61	0,70	0,92
	$l_{ст}, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	1,10	1,04	0,87	0,92	0,58	0,50	0,44	0,40	0,30	0,19
6	$l_2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14
	$d_2, \text{мм}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
7	$t_1, ^\circ\text{C}$	1400	1350	1300	1250	1200	1150	1100	1050	1000	950
	$a_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	100
	$a_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
8	$t_1^{cm}, ^\circ\text{C}$	150	200	250	275	300	325	350	400	450	500
	$d_2, \text{мм}$	250	275	300	325	350	400	450	500	550	600

Продолжение таблицы

Задача	Величины	Предпоследняя цифра шифра									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
9	$a_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35
	$a_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	2800	2750	2700	2650	2600	2550	2500	2450	2400	2350
	$d_n, \text{мм}$	2	3	4	5	6	7	8	6	5	4
10	$t_b, ^\circ\text{C}$	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
	$a, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
	$l, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15
11	$w_0, \text{м}/\text{с}$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	$t_0, ^\circ\text{C}$	80	90	100	120	140	160	180	200	225	250
	$d_0, \text{мм}$	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
12	$t_b, ^\circ\text{C}$	60	70	80	90	100	120	140	160	180	200
	$G, \text{кг}/\text{ч}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
13	$w, \text{м}/\text{с}$	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
	$t_{ж}, ^\circ\text{C}$	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25
	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55
14	$w, \text{м}/\text{с}$	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10	11
	$t_b, ^\circ\text{C}$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
15	$G \cdot 10^3, \text{кг}/\text{с}$	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
	$t'_e, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	$t''_e, ^\circ\text{C}$	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
16	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	300	290	280	270	260	250	240	230	220	210
	e_2	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,16	0,12	0,10
17	$t_r, ^\circ\text{C}$	250	270	300	320	350	370	400	420	450	470
	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	110	140	150	180	190	200	220	250	270	300
	$a, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	25	28	35	37	40	45	48	50	52	55
18	$d, \text{м}$	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,38	0,32	0,28	0,22	0,18
	$q_l, \text{кВт}/\text{пог.м}$	3,90	5,70	7,82	10,3	13,0	14,3	12,4	11,8	10,1	8,78
	e	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75
19	$t_1^{cm}, ^\circ\text{C}$	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250
	e	0,60	0,62	0,64	0,68	0,70	0,72	0,74	0,76	0,78	0,80
20	$t_{ст}, ^\circ\text{C}$	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
	e	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАДАНИЯ №2**

Для определения плотности теплового потока q , Вт/м², через плоскую стенку и линейной плотности теплового потока q_l Вт/м через цилиндрическую стенку при известных температурах граничных поверхностей t_1^{cm} , и t_{n+1}^{cm} , используются формулы, полученные на основании закона Фурье:

$$q = \frac{t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm}}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{l_i}}; \quad (1)$$

$$q_l = \frac{2p(t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{l_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}, \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3, \dots, n$;

n - число отдельных слоев в стенке;

d_i - толщина каждого слоя стенки, м;

l_i - коэффициент теплопроводности каждого слоя, Вт/(м*К).

Для сравнения линейной плотности тепловых потоков при перемене мест тепловой изоляции трубы в задаче 4 воспользоваться приближенной формулой:

$$q_l = \frac{p(t_1^{cm} - t_{n+1}^{cm})}{\frac{d_1}{l_1} d_{m1} + \frac{d_2}{l_2} d_{m2}}, \quad (3)$$

где d_{m1} и d_{m2} - средние диаметры первого и второго цилиндрических слоев, м.

Относительное изменение линейной плотности теплового потока при перемене слоев изоляции местами:

$$\Delta\% = \frac{q_l^{II} - q_l^I}{q_l^I} \times 100$$

В задачах 3, 5, 7 и 9 для расчета плотности теплового потока через плоскую стенку можно использовать следующие формулы:

$$q = a_1(t_1 - t_1^{cm}); \quad (4)$$

$$q = a_2(t_2^{cm} - t_2); \quad (5)$$

$$q = k(t_1 - t_2), \quad (6)$$

где a_1 и a_2 - коэффициенты теплоотдачи со стороны горячей и холодной жидкостей, омывающих стенку, Вт/(м²*К);

t_1 и t_2 - температуры жидкостей, омывающих стенку;

t_1^{cm} и t_2^{cm} - температуры поверхностей стенки со стороны горячей и холодной жидкостей;

k - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²*К);

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{l_i} + \frac{1}{a_2}} \quad (7)$$

Для учета зависимости коэффициента теплопроводности материала стенки от ее температуры (задача 7) последней следует предварительно задаться. Например, $t_{cm}^{cp} \approx 0,5(t_1 + t_2)$.

После определения коэффициента теплопередачи (7) и плотности теплового потока по уравнению (6) найти температуры поверхностей стенок из уравнений (4) и (5) и проверить значение средней температуры стенки. В случае существенного расхождения расчет следует повторить.

Расчетная формула для определения линейной плотности теплового потока ql , через многослойную цилиндрическую стенку (задачи 2 и 6) базируется на основе совместного решения уравнений теплоотдачи (8) и (9) и теплопроводности (2):

$$ql = a_1(t_1 - t_1^{cm})pd_1; \quad (8)$$

$$ql = a_2(t_{n+1}^{cm} - t_2)pd_2 \quad (9)$$

Исключая неизвестные величины t_1^{cm} , получим:

$$ql = \frac{p(t_1 - t_2)}{\frac{1}{a_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2l_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{a_2 d_2}}, \quad (10)$$

где n - число слоев в цилиндрической стенке.

Для нахождения толщины слоя изоляции трубы в задаче 8 следует сначала определить линейную плотность теплового потока (по заданным величинам a_2 , t_2^{cm} , t_2 и d_2) и требуемое термическое сопротивление изоляции (см. формулу 2):

$$R_t = \frac{1}{2pl} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (11)$$

Линейная плотность теплового потока ql , и ток I в электрическом проводе (задача 10) могут быть найдены из уравнения теплового баланса:

$$ql = a(t_{cm} - t_6)pd_1 = I^2 r, \quad (12)$$

где r - активное электрическое сопротивление провода, Ом/м.

Для определения искомой температуры поверхности t'_{cm} изолированного провода при том же значении тока, т. е. при $ql = idem$, следует воспользоваться формулой (2) при $n = 1$, предварительно найдя температуру наружной поверхности изоляции $t_{из}$ из уравнения:

$$ql = a(t_{из} - t_6)pd_2 \quad (13)$$

Максимальный ток определяется по предельно-допустимой температуре t_{cm}^{max} из уравнения:

$$q_l^{max} = \frac{p(t_{cm}^{max} - t_6)}{\frac{1}{2l} \ln \frac{d+2d}{d} + \frac{1}{a_2 d_2}} \quad (14)$$

Требуемые значения кинематического коэффициента вязкости n_m и скорости w_m течения жидкости в модели (задача 11) определяются из условия подобия процессов в модели и образце, а именно из условия равенства критериев Re и Pr , т. е.:

$$\frac{w_m d_m}{n_m} = \frac{w_0 d_0}{n_0}; \quad \frac{n_m}{a_m} = \frac{n_0}{a_0}$$

Для нахождения значений коэффициентов конвективной теплоотдачи в задачах 12, 13; 14, 15, и 18 рекомендуется воспользоваться формулами, приведенными в контрольных вопросах 9 - 12. В формулах индекс «ж» указывает, что величины отнесены к определенной температуре $t_{ж}$, т. е. средней температуре жидкости (среды).

Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²*К), при пленочной конденсации пара на поверхности горизонтальной трубы может быть определен по зависимости по формуле:

$$a = 0,72 \left(\frac{A}{d\Delta t} \right)^{0,25}, \quad (15)$$

где $A = 5400 I^3 \frac{r}{n}$;

$$\Delta t = t_n - t_{cc};$$

r - теплота парообразования (конденсации), кДж/кг.

Значения коэффициента теплопроводности I , плотности r и коэффициента кинематической вязкости n конденсата здесь отнесены к средней температуре пленки $t_{cp} = 0,5 (t_n + t_{cc})$.

Температура насыщения t_n определяется по заданному давлению пара из таблиц насыщенного водяного пара. Из этих же таблиц находят значение теплоты парообразования.

Для нахождения коэффициента теплоотдачи конвекцией в условиях свободного движения воздуха около горизонтальной трубы (задача 16) следует использовать критериальную формулу, приведенную в вопросе 12. Тепловой поток излучением может быть найден по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_l = eC_0 \left[\left(\frac{T_{CT}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_B}{100} \right)^4 \right] pdl, \quad (16)$$

где $C_0 = 5,67$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²*К⁴).

Коэффициент теплоотдачи излучением:

$$a_l = \frac{Q_l}{pdl(t_{CT} - t_B)} \quad (17)$$

Для нахождения действительной температуры потока по показанию термометра (задача 17) следует использовать уравнение теплового баланса в виде:

$$a(t_{\theta} - t_T) = eC_0 \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] \quad (18)$$

Температура излучающей поверхности (задача 18) может быть найдена из уравнения (16).

При сложном теплообмене (конвекцией и излучением) в задаче 28 результирующая плотность теплового потока определяется как сумма конвективной и лучистой составляющих:

$$q = a_k(t_{CT} - t_B) + eC_0 \left[(0,01t_{CT} + 2,73)^4 - (0,01t_B + 2,73)^4 \right],$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м²*К⁴) - коэффициент излучения абсолютно черной поверхности.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ТИПОВОЙ ЗАДАЧИ

Задача № _____

2 кг воздуха сжимается по политропе при $n = 1,3$ с уменьшением объема в 5 раз. Определить работу и количество теплоты в процессе, а также изменение калорических параметров, если $t_1 = 17^\circ\text{C}$ и $p_1 = 0,2$ МПа. Показать для этого процесса схему энергобаланса и графики в pV - и Ts -координатах. Теплоемкость воздуха принять постоянной.

Дано:

$$m = 2 \text{ кг}; \quad e = 5; \quad t_1 = 17^\circ\text{C}; \quad p_1 = 0,2 \text{ МПа} = 0,2 \times 10^6 \text{ Па}.$$

Перевод в СИ:

$$T_1 = 17 + 273,15 = 290,15 \text{ К}$$

Решение:

Из уравнения состояния идеального газа для m кг воздуха определяем его начальный объем

$$p_1 V_1 = m R_{\text{возд}} T_1, \quad \text{откуда}$$

$$V_1 = \frac{m R_{\text{возд}} T_1}{p_1},$$

$$\text{где } R_{\text{возд}} = \frac{R_m}{m_{\text{возд}}}, \quad \text{тогда } V_1 = \frac{m R_m T_1}{p_1 m_{\text{возд}}}.$$

Универсальная газовая постоянная $R_m = 8314$ кДж/кмоль*К, молекулярная масса воздуха $m_{\text{возд}} = 29$ кг/кмоль (табл. П2 приложения). Тогда

$$V_1 = \frac{m R_m T_1}{p_1 m_{\text{возд}}} = \frac{2 \cdot 8314 \cdot 290,15}{0,2 \cdot 10^6 \cdot 29} = 0,832 \text{ м}^3$$

Определяем конечный объем

$$V_2 = \frac{V_1}{e} = \frac{0,832}{5} = 0,166 \text{ м}^3$$

Из соотношения параметров p и V в политропном процессе определяем давление в конце процесса сжатия

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n, \quad \text{откуда } p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n = 0,2 \cdot \left(\frac{0,832}{0,166} \right)^{1,3} = 1,63 \text{ МПа}$$

Конечную температуру определяем из уравнения состояния идеального газа для m кг газа в конце процесса сжатия

$$p_2 V_2 = m R_{\text{возд}} T_2, \quad \text{откуда}$$

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{m R_{\text{возд}}} = \frac{p_2 V_2 m_{\text{возд}}}{m R_m} = \frac{1,63 \cdot 10^6 \cdot 0,166 \cdot 29}{2 \cdot 8314} = 472 \text{ К},$$

или $t_2 = 198,85^\circ\text{C}$.

Определяем работу в политропном процессе для одного кг воздуха

$$l_n = \frac{R_{\text{возд}}}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{R_m}{(n-1)m_{\text{возд}}} (T_1 - T_2) = \frac{8314}{(1,3-1)29} (290,15 - 472) = -173,78 \text{ кДж/кг}$$

тогда работа в процессе для m кг воздуха:

$$L_n = m \cdot l_n = 2(-173,78) = -347,56 \text{ кДж}.$$

Определяем количество теплоты в политропном процессе

$$q_n = c_n (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где теплоемкость политропного процесса c_n :

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1} = \frac{m c_v}{m_{\text{возд}}} \cdot \frac{n-k}{n-1},$$

где $m c_v = m c_p - R$ (из уравнения Майера).

Из таблицы П.3 приложения определяем интерполированием значение $m c_p$ для температуры $t_2 = 198,85$ °С (для воздуха):

при $t_2 = 100$ °С $m c_p = 29,15$ кДж/(моль*К), при $t_2 = 200$ °С $m c_p = 29,30$ кДж/(моль*К),

тогда $\Delta m c_p = \frac{29,30 - 29,15}{100} \cdot 98,85 = 0,148275$ кДж/(моль*К). Отсюда $m c_p$ для

температуры $t_2 = 198,85$ °С будет равен: $29,15 + 0,148275 = 29,298275$ кДж/(моль*К), тогда

$$m c_v = m c_p - R = 29,298275 \cdot 10^3 - 8314 = 20984,275 \text{ Дж/(моль*К)} = 20,984 \text{ кДж/(моль*К)}.$$

Для воздуха показатель адиабаты $k = 1,4$. Тогда

$$c_n = \frac{m c_v}{m_{\text{возд}}} \cdot \frac{n-k}{n-1} = \frac{20,984}{29} \cdot \frac{1,3-1,4}{1,3-1} = -0,241 \text{ кДж/(кг*К)}.$$

Подставляя значение c_n в формулу (1), получим

$$q_n = c_n(t_2 - t_1) = -0,241(198,85 - 17) = -43,83 \text{ кДж/кг}.$$

Для m кг воздуха количество теплоты

$$Q_n = m q_n = 2(-43,83) = -87,66 \text{ кДж}.$$

Определяем изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v(t_2 - t_1) = \frac{m c_v}{m_{\text{возд}}}(t_2 - t_1) = \frac{20,984}{29}(198,85 - 17) = 131,584 \text{ кДж/кг}.$$

Для m кг воздуха изменение внутренней энергии

$$\Delta U = m \Delta u = 2 \cdot 131,584 \text{ кДж}.$$

Определяем изменение энтальпии

$$\Delta i = c_p(t_2 - t_1) = \frac{m c_p}{m_{\text{возд}}}(t_2 - t_1) = \frac{29,298275}{29}(198,85 - 17) = 183,72 \text{ кДж/кг}.$$

Для m кг воздуха изменение энтальпии

$$\Delta I = m \Delta i = 2 \cdot 183,72 = 367,44 \text{ кДж}.$$

Определяем изменение энтропии

$$\Delta s = c_n \ln \frac{T_2}{T_1} = -0,241 \cdot \ln \frac{472}{290,15} = -0,117 \text{ кДж/(кг*К)}.$$

Для m кг воздуха изменение энтропии

$$\Delta S = m \Delta s = 2(-0,117) = -0,234 \text{ кДж/К}.$$

Таким образом, в рассмотренном политропном процессе затрачиваемая работа расходуется на увеличение внутренней энергии и на отводимую теплоту.

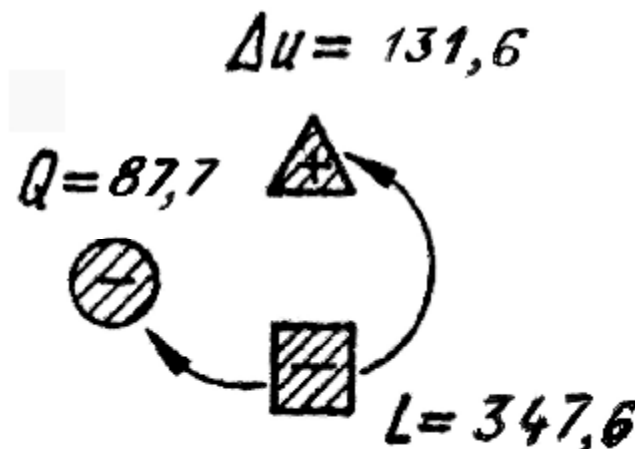


Схема энергобаланса

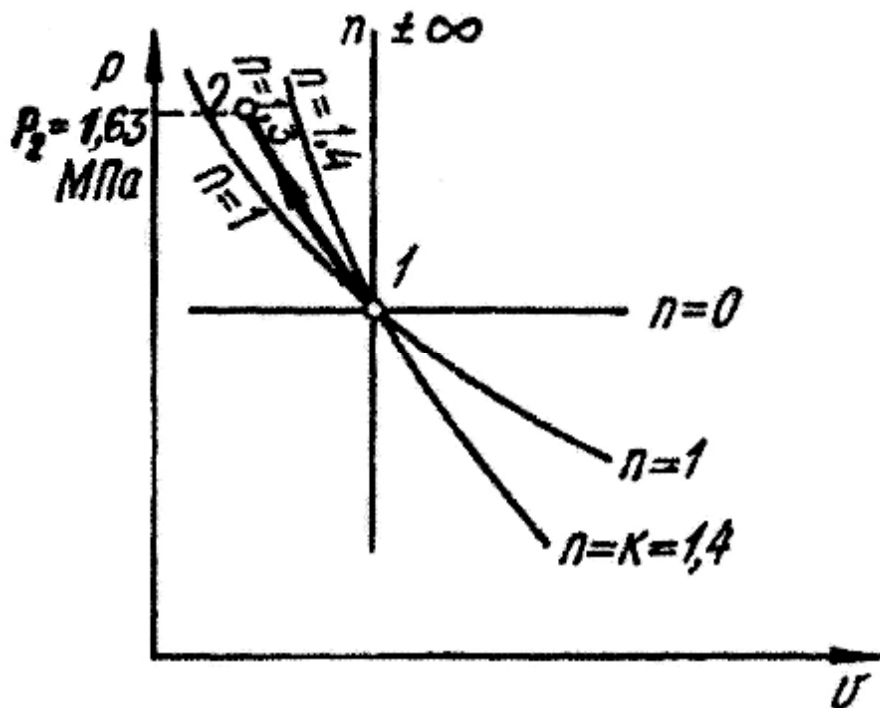


График политропного процесса в p v -координатах

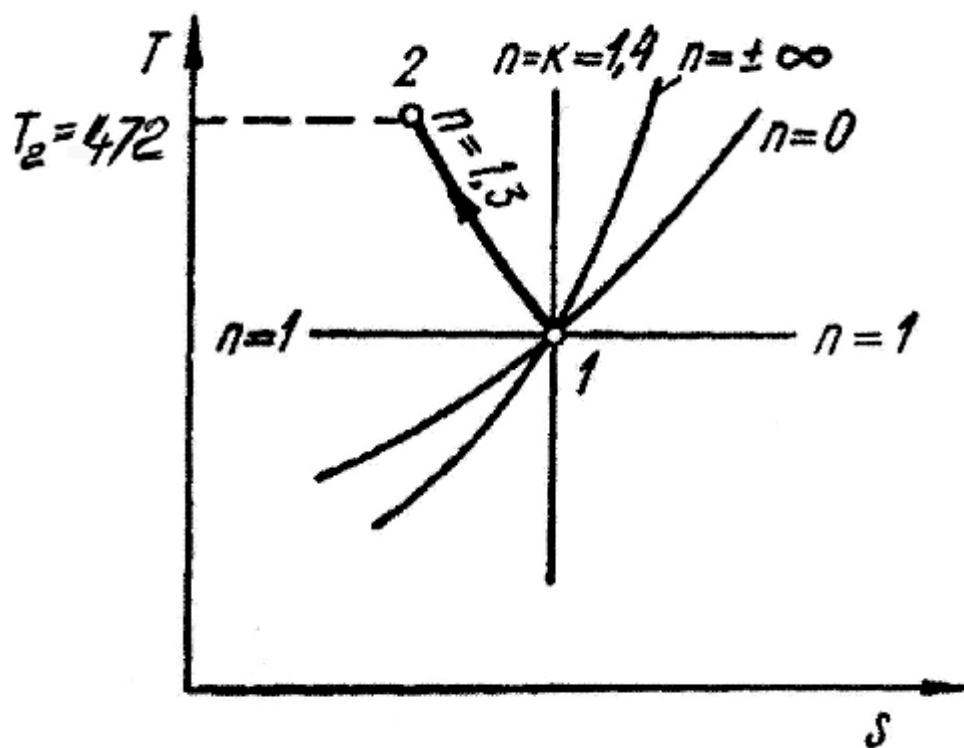


График политропного процесса в T s -координатах

Таблица П.1 Единицы СИ и переводные множители для важнейших теплотехнических величин

Наименование величии	Единицы СИ	Переводные множители для некоторых внесистемных единиц
Масса	1 кг	1 т. е. м. = 1 кг·с ² /м = 9,81 кг
Сила	1 Н = 1 кг·м/с ²	1 кГ = 9,81 Н
Плотность	1 кг/м ³	1 т. е. м./м ³
Давление	1 Па = 1 Н/м ² 1 МПа = 10 ⁶ Па	1 ат = 1 кГ/см ² = 9,81 × × 10 ⁴ Н/м ² = 9,8 · 10 ⁴ Па = = 0,0981 МПа 1 бар = 1 · 10 ⁵ Н/м ² = 0,1 МПа 1 мм рт. ст. = 133,322 Н/м ² 1 мм вод. ст. = 9,81 Н/м ²
Энергия, работа, количество теплоты	1 Дж = 1 Н·м	1 (кГ · м) = 9,81 Дж 1 ккал = 4,19 · 10 ³ Дж 1 ккал/ч = 1,163 Вт, 1 кВт·ч = 3,6 · 10 ⁶ Дж = = 3,6 · 10 ³ кДж
Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи	1 Вт/(м ² ·К)	1 ккал/(ч·м ² ·К) = = 1,163 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплопроводности	1 Вт/(м·К)	1 ккал/(ч·м·К) = 1,163 Вт/(м·К)
Теплоемкость	1 Дж/К	1 ккал/К = 4,19 · 10 ³ Дж/К = = 4,19 кДж/К
Энтропия	1 Дж/К	1 ккал/К = 4,19 кДж/К
Динамическая вязкость	1 (Н·с)/м ²	1 П = 0,1 (Н·с)/м ²
Кинематическая вязкость	1 м ² /с	1 Ст = 1 · 10 ⁻⁴ м ² /с

Таблица П.2 Характеристики некоторых газов

Газ	Химическая формула	Молекулярная масса μ (приближенное значение), кг/кмоль	Газовая постоянная при нормальных условиях R_g , Дж/(кг·К)	Плотность при нормальных условиях ρ_n , кг/м ³	Изобарная теплоемкость при $t=0^\circ\text{C}$ c_p , кДж/(кг·К)	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ при $t=0^\circ\text{C}$
Гелий	He	4	2080	0,18	5,23	1,67
Водород	H ₂	2	4130	0,089	14,20	1,41
Азот	N ₂	28	297	1,25	1,04	1,40
Кислород	O ₂	32	260	1,43	0,01	1,40
Оксид углерода	CO	28	297	1,25	1,04	1,40
Воздух	—	29	287	1,29	1,01	1,40
Водяной пар	H ₂ O	18	462	0,80	1,86	1,33
Двуокись углерода	CO ₂	44	189	1,98	0,82	1,30
Метан	CH ₄	16	520	0,72	2,17	1,32
Ацетилен	C ₂ H ₂	26	320	1,17	1,61	1,25

Таблица П.3 Средняя молярная теплоемкость газов при постоянном давлении

$t, ^\circ\text{C}$	ср., кДж/(моль·К)						
	H ₂	N ₂	O ₂	Воздух	CO ₂	H ₂ O	CO
0	28,62	29,12	29,27	29,07	35,86	33,50	29,12
100	28,93	29,14	29,54	29,15	38,11	33,74	29,18
200	29,07	29,23	29,93	29,30	40,06	34,12	29,30
300	29,12	29,38	30,40	29,52	41,76	34,58	29,52
400	29,19	29,60	30,88	29,79	43,25	35,09	29,79
500	29,25	29,86	31,33	30,10	44,57	35,63	30,10
600	29,32	30,15	31,76	30,41	45,75	36,20	30,42
700	29,41	30,45	32,15	30,72	46,81	36,79	30,75
800	29,52	30,75	32,50	31,03	47,76	37,39	31,07
900	29,65	31,04	32,83	31,32	48,62	38,01	31,38
1000	29,79	31,31	33,12	31,60	49,40	38,62	31,67
1100	29,94	31,58	33,39	31,86	50,10	39,23	31,94
1200	30,11	31,83	33,63	32,11	50,74	39,83	32,19
1300	30,29	32,07	33,86	32,34	51,32	40,41	32,43
1400	30,47	32,29	34,08	32,57	51,86	40,98	32,65
1500	30,65	32,50	34,28	32,77	52,35	41,53	32,86
1600	30,83	32,70	34,47	32,93	52,80	42,06	33,05
1700	31,01	32,88	34,66	33,15	53,22	42,58	33,23
1800	31,10	33,05	34,83	33,32	53,60	43,07	33,40
1900	31,37	33,22	35,01	33,48	53,96	43,94	33,56
2000	31,55	33,37	35,17	33,64	54,29	44,00	33,71

Таблица П.4 Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения
(по давлению)

p , МПа	t_H , °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r' , кДж/кг	s' , кДж/(кг×К)	s'' , кДж/(кг×К)
0,0010	6,936	0,0010001	130,04	29,18	2513,4	2484,2	0,1053	8,9749
0,0025	13,001	0,0010007	88,38	54,61	2524,7	2470,1	0,1952	8,8268
0,0020	17,486	0,0010014	67,24	73,40	2533,1	2459,7	0,2603	8,7227
0,0025	12,071	0,0010021	54,42	88,36	2539,5	2451,1	0,3119	8,6424
0,0030	24,078	0,0010028	45,77	100,93	2545,3	2444,4	0,3547	8,5784
0,0035	26,674	0,0010035	39,56	111,81	2549,9	2438,1	0,3912	8,5222
0,0040	28,96	0,0010042	34,93	121,33	2553,7	2432,3	0,4225	8,4737
0,0050	32,89	0,0010054	28,23	137,79	2560,9	2423,1	0,764	8,3943
0,0060	36,17	0,0010065	23,77	151,49	2567,1	2415,6	0,5209	8,3297
0,0070	39,02	0,0010075	20,56	163,39	2571,8	2408,4	0,5588	8,2734
0,0080	41,53	0,0010085	18,13	173,89	2576,4	2402,5	0,5919	8,2263
0,0090	43,78	0,0010094	16,22	183,31	2580,5	2397,2	0,6222	8,1854
0,0100	45,82	0,0010102	14,70	191,84	2583,9	2392,1	0,6496	8,1494
0,012	49,44	0,0010118	12,37	206,96	2590,6	2383,7	0,6966	8,0850
0,014	52,57	0,0010132	10,69	220,05	2596,1	2376,0	0,7368	8,0305
0,016	55,34	0,0010146	9,437	231,63	2601,1	2369,5	0,7722	7,9852
0,018	57,82	0,0010159	8,448	242,03	2605,4	2363,3	0,8040	7,9445
0,020	60,08	0,0010171	7,652	251,48	2609,2	2357,7	0,8324	7,9075
0,025	64,99	0,0010198	6,201	272,03	2617,6	2345,5	0,8934	7,8300
0,030	69,12	0,0010223	5,232	289,30	2624,6	2335,3	0,9441	7,7673
0,040	75,87	0,0010264	3,999	317,62	2636,3	2318,7	1,0261	7,6710
0,050	81,33	0,0010299	3,243	340,53	2645,2	2304,7	1,0912	7,5923
0,060	85,94	0,0010330	2,734	359,90	2653,1	2293,2	1,1453	7,5313
0,070	89,95	0,0010359	2,367	376,79	2659,8	2283,1	1,1920	7,4799
0,080	93,50	0,0010385	2,089	391,75	2665,3	2273,5	1,2331	7,4342
0,090	96,71	0,0010409	1,871	405,19	2670,2	2265,1	1,2699	7,3936
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,80	0,0010472	1,430	439,34	2683,6	2243,6	1,4610	7,2972
0,14	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2790,1	2231,7	1,4109	7,2460
0,16	113,31	0,0010543	1,092	475,41	2796,3	2220,8	1,4550	7,2017
0,18	116,93	0,0010575	0,9782	490,68	2706,8	2211,1	1,4945	7,1628
0,20	120,23	0,0010606	0,8860	504,74	2707,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,22	123,27	0,0010633	0,8103	517,7	2711,0	2193,3	1,5632	7,0953
0,24	126,09	0,0010659	0,7469	529,9	2714,9	2185,0	1,5931	7,0658
0,26	128,73	0,0010684	0,6929	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,28	131,20	0,0010709	0,6463	551,7	2722,3	2170,7	1,6471	7,0152
0,30	133,54	0,0010733	0,6055	561,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0,35	138,87	0,0010787	0,5241	584,4	2732,3	2147,9	1,7276	6,9404
0,40	143,62	0,0010836	0,4623	604,6	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	623,0	2743,9	2120,9	1,8204	6,8572
0,50	151,84	0,0010927	0,3479	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011009	0,3156	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609

Продолжение таблицы П.4

$p, \text{МПа}$	$t_{\text{п}}, \text{°C}$	$v', \text{ м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{ м}^3/\text{кг}$	$i', \text{ кДж/кг}$	$i'', \text{ кДж/кг}$	$r', \text{ кДж/кг}$	$s', \text{ кДж/(кг} \times \text{°C)}$	$s'', \text{ кДж/(кг} \times \text{°C)}$
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2763,7	2066,5	1,9923	6,7090
0,8	170,41	0,0011149	0,2403	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
0,9	175,36	0,0011213	0,2149	742,7	2777,7	2031,0	2,0945	6,6223
1,0	179,88	0,0011273	0,1945	762,4	2777,7	2015,3	2,1383	6,5867
1,1	184,05	0,0011330	0,1775	781,3	2781,2	1999,9	2,1786	6,5523
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
1,3	191,60	0,0011438	0,1512	814,6	2787,4	1972,7	2,2510	6,4954
1,4	195,04	0,0011488	0,1408	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,5	198,28	0,0011538	0,1317	844,5	2791,8	1947,3	2,3148	6,4458
1,6	201,36	0,0011587	0,1238	858,3	2793,5	1935,2	2,3437	6,4221
1,7	204,30	0,0011633	0,1167	871,7	2795,3	1923,5	2,3712	6,4000
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	884,2	2796,5	1912,3	2,3975	6,3794
1,9	209,78	0,0011723	0,1048	896,6	2797,9	1901,3	2,4224	6,3597
2,0	212,37	0,0011768	0,09961	908,6	2799,2	1890,7	2,4471	6,3411
2,2	217,24	0,0011851	0,09069	930,9	2800,6	1869,7	2,4923	6,3056
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	951,8	2801,8	1850,0	2,5346	6,2727
2,6	226,04	0,0012011	0,07687	971,9	2802,6	1830,8	2,5734	6,2407
2,8	230,04	0,0012088	0,07142	990,2	2803,1	1812,8	2,6101	6,2129
3,0	233,87	0,0012164	0,06663	1008,4	2803,1	1794,7	2,6455	6,1859
3,5	242,54	0,0012344	0,05706	1049,8	2802,8	1753,0	2,7251	6,1242
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	1154,2	2793,9	1639,6	2,9210	5,9739
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2784,4	1570,5	3,0276	5,8894
7,0	285,60	0,0013510	0,02738	1267,6	2772,3	1504,7	3,1221	5,8143
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1317,3	2758,6	1441,2	3,2079	5,7448
9,0	303,31	0,0014174	0,02049	1363,9	2742,6	1378,8	3,2866	5,6783
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
11,0	318,04	0,0014886	0,01597	1450,2	2705,2	1255,0	3,397	5,5528
12,0	324,64	0,001527	0,01426	1491,1	2684,6	1193,5	3,4966	5,4930
13,0	330,81	0,001568	0,01278	1531,3	2662,2	1131,1	3,5606	5,4333
14,0	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2637,9	1067,0	3,6233	5,3731
16,0	347,32	0,001710	0,00931	1649,6	2581,7	932,1	3,7456	5,2478
18,0	356,96	0,001839	0,00750	1732,3	2510,6	778,4	3,8708	5,1054
20,0	365,72	0,00203	0,00586	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,9280
22,0	373,71	0,00269	0,00378	2009,7	2195,6	185,9	4,2543	4,5815

Таблица П.5 Насыщенный пар и вода на линии насыщения (по температурам)

$t_{\text{н}}, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж/(кг} \times \text{K)}$	$s'', \text{кДж/(кг} \times \text{K)}$
0	0,0006108	0,0010002	206,321	0	2501,0	2501,0	0	9,1565
10	0,0012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
20	0,0023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
30	0,0042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
40	0,0073749	0,0010078	19,548	167,45	2574	2406,5	0,5721	8,2576
50	0,012335	0,0010121	19,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771
60	0,019919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
70	0,031161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
80	0,047359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
90	0,070108	0,00110361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
100	0,101325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
120	0,19854	0,0010606	0,89202	503,07	2706,6	2202,9	1,5276	7,1310
140	0,36136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
160	0,61804	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
180	1,0027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
200	1,5551	0,00115665	0,12714	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
220	2,3201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9	1856,2	2,5178	6,2819
240	3,3480	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6	1764,0	2,7021	6,1397
260	4,6940	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	1660,2	2,8850	5,9989
280	6,4191	0,0013324	0,03010	1237,0	2778,6	1541,6	3,0687	5,8555
300	8,5917	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,4	1403,0	2,2559	5,7038
320	11,290	0,0014993	0,01544	1463,4	2699,6	1236,2	2,4513	5,5356
340	14,608	0,0016390	0,01078	1596,8	2622,3	1025,5	3,6638	5,3363
360	18,674	0,0018930	0,006970	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
374	22,084	0,002834	0,003482	2039,2	2150,7	111,5	4,3374	4,5096

Таблица П.6 Перегретый водяной пар (сокращенная таблица)

p, МПа	Параметры	Значения параметров									
		320° С	340° С	360° С	380° С	400° С	420° С	440° С	480° С	500° С	540° С
0,4	ν	0,6785	0,7021	0,7257	0,7726	0,7960	0,8193	0,8660	0,8893	0,9257	0,9590
	i	3107,8	3148,9	3190,2	3273,2	3315,2	3357,3	3442,0	3484,7	3572	3615
	s	7,6872	9,7034	7,7717	7,8991	7,9603	8,0201	8,1357	8,1917	8,099	8,262
0,8	ν	0,3363	0,3484	0,3604	0,3842	0,3961	0,4079	0,4315	0,4432	0,4667	0,4784
	i	3098,7	3140,7	3182,7	3267,2	3309,5	3352,0	3437,4	3480,5	3567,2	3610,9
	s	7,3059	7,3756	7,4430	7,5724	7,6344	7,6947	7,8118	7,8677	7,9771	8,0302
1,0	ν	0,2678	0,2776	0,2873	0,3066	0,3161	0,3256	0,3446	0,3540	0,3729	0,3823
	i	3094,0	3136,5	3178,9	3264,0	3306,6	3349,3	3435,1	3478,3	3565,3	3609,1
	s	7,1971	7,2675	7,3356	7,4806	7,5288	7,5890	7,7061	7,7627	7,8424	7,9256
1,2	ν	0,2222	0,2304	0,2386	0,2548	0,2628	0,2708	0,2867	0,2946	0,3103	0,3182
	i	3089,3	3132,2	3175,1	3260,9	3303,7	3346,6	3432,8	3476,1	3563,4	3607,3
	s	7,1070	7,1782	7,2410	7,3784	7,4411	7,5021	7,6197	7,6765	7,7865	7,8399

Продолжение таблицы П.6

p, МПа	Параметры	Значения параметров									
		320° С	340° С	350° С	380° С	400° С	420° С	440° С	480° С	500° С	540° С
1,6	ν	0,1651	0,1714	0,1777	0,1900	0,1961	0,2022	0,2142	0,2202	0,2322	0,2381
	i	3079,7	3123,6	3167,4	3254,5	3297,9	3341,2	3428,1	3471,8	3559,6	3603,7
	s	6,9921	6,0350	7,1061	7,2386	7,3020	7,3637	7,4823	7,5395	7,6502	7,7099
2,0	ν	0,1308	0,1360	0,1411	0,1512	0,1561	0,1610	0,1708	0,1756	0,1852	0,1900
	i	3069,8	3114,9	3159,5	3248,1	3291,9	3335,8	3423,5	3467,4	3556,8	3600,2
	s	6,8466	6,9212	6,9929	7,1285	7,1927	7,2550	7,3747	7,4323	7,5437	7,5977
2,5	ν	0,1033	0,1076	0,1119	0,1201	0,1241	0,1281	0,1360	0,1398	0,1477	0,1516
	i	3057,1	3103,6	3149,6	3239,9	3284,5	3328,9	3417,5	3461,9	3551,0	3595,7
	s	6,7273	6,8044	6,8781	7,0165	7,0817	7,1449	7,2659	8,3240	7,4363	7,4905
3,0	ν		0,08871	0,09232	0,09933	0,10276	0,1061	0,1128	0,1161	0,1227	0,1269
	i		3092,1	3139,3	3231,6	3276,9	3321,0	3411,6	3456,4	3546,1	3591,1
	s		6,7060	6,7818	6,9231	6,9894	7,0575	7,1758	7,2345	7,3477	7,4024
5,0	ν		0,06070	0,06310	0,06780	0,06902	0,06220	0,06644	0,06853	0,07262	0,07464
	i		3042,2	3095,9	3196,9	3245,4	3293,2	3387,2	3433,8	3526,5	3572,8
	s		6,4077	6,4939	6,6486	6,7196	6,7875	6,9156	6,9768	7,0938	7,1501

Продолжение таблицы П.6

p, МПа	Пара Метры	Значение параметра									
		320° С	340° С	360° С	400° С	420° С	440° С	480° С	500° С	540° С	600° С
7,0	σ		0,03421	0,03623	0,03992	0,04165	0,04332	0,04654	0,04810	0,05116	0,05266
	ε		2985,5	3047,6	3159,7	3212,1	3263,0	3361,9	3410,5	3506,4	3554,1
	δ		6,1797	6,2793	6,4511	6,5278	6,6002	6,7352	6,7988	6,9198	6,9778
9,0	σ		0,02484	0,02659	0,02993	0,03139	0,03280	0,03546	0,03675	0,03923	0,04044
	ε		2019,6	2932,2	3119,7	3176,7	3231,2	3335,7	3386,4	3485,9	3535,0
	δ		5,9771	6,0953	6,2891	6,3725	6,4502	6,5927	6,6592	6,7846	6,8444
13,0	σ		0,01402	0,01604	0,01901	0,02025	0,02139	0,02350	0,02448	0,02637	0,02727
	ε		2738,8	2858,9	3029,3	3098,6	3162,6	3280,4	3336,1	3443,4	3495,8
	δ		5,5589	5,7518	6,0132	6,1147	6,2057	6,3666	6,4395	6,5749	6,6386
17,0	σ			0,009616	0,01303	0,01422	0,01527	0,01712	0,01797	0,01954	0,02029
	ε			2553,6	2920,2	3008,6	3085,7	3220,8	3282,6	3399,1	3455,1
	δ			6,3475	5,7575	5,8870	5,99682	6,1811	6,2620	6,4090	6,4770
22,0	σ				0,008262	0,009586	0,01064	0,01237	0,01312	0,01449	0,01513
	ε				2,739,7	2872,8	2975,4	3139,7	3210,8	3341,0	3402,1
	δ				6,4114	6,6064	7,7523	6,9767	6,0700	6,2342	6,3063
24,0	σ				0,006738	0,008205	0,009294	0,01101	0,01174	0,01305	0,01366
	ε				2642,0	2808,2	2925,7	3104,9	3180,5	3316,9	3380,2
	δ				5,2439	5,4876	5,6547	5,8096	5,9987	6,1708	6,2478
30,0	σ				0,002806	0,004919	0,006221	0,007982	0,008679	0,009889	0,01043
	ε				2159,1	2557,2	2751,7	2992,2	3083,0	3241,7	3312,6
	δ				4,4854	5,0694	5,3464	5,6751	5,7354	5,9945	6,0806

Рис. П.1 Рабочая часть $i - s$ -диаграммы водяного пара.

