

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ  
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И  
ОБРАЗОВАНИЯ

ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра

безопасности жизнедеятельности и теплоэнергетики

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Методические рекомендации по изучению дисциплины  
и выполнению контрольной работы для студентов направления  
подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника»  
заочной формы обучения

КАРАВАЕВО  
КГСХА  
2014

УДК 621.1.016

ББК

*Составитель:* сотрудник кафедры безопасность жизнедеятельности и теплоэнергетики Костромской ГСХА к.х.н., доцент *Л.Н. Шабалина*

*Рецензент:*

*Рекомендовано к изданию  
методической комиссией инженерно-технологического факультета  
протокол №\_\_ от \_\_\_\_\_2014г.*

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ:** Методические рекомендации по изучению дисциплины и выполнению контрольной работы для студентов направления подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» заочной формы обучения / сост. Л.Н. Шабалина. – КАРАВАЕВО: КГСХА, 2014. – 31с.

Издание содержит рабочую программу, контрольные вопросы, методические указания по самостоятельному изучению дисциплины, контрольные задания и приложения с таблицами.

Учебно-методическое издание предназначено для студентов направления подготовки 140400.62 «Электроэнергетика и электротехника» профиля «Электроснабжение» заочной формы обучения

УДК 621.1.016

ББК

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Общие рекомендации по изучению дисциплины.....	5
Рабочая программа дисциплины.....	6
Контрольная работа.....	10

## ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Энергетические установки» является одной из базовых дисциплин профессионального цикла при подготовке бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» и играет существенную роль в формировании у них инженерного мышления. Эта дисциплина формирует знания о видах природных источников энергии и способах преобразования их в электрическую и тепловую энергию.

В соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки бакалавра 140400 «Электроэнергетика и электротехника» в результате изучения дисциплины обучающиеся должны:

**Знать:** основные виды энергоресурсов, способы преобразования их в электрическую и тепловую энергию, основные типы энергетических установок, основы преобразования энергии в них в соответствии с законами термодинамики, основные термодинамические процессы и циклы, свойства рабочих тел, основы законов теплообмена.

**Уметь:** использовать методы оценки основных видов энергоресурсов и преобразования их в электрическую и тепловую энергию; рассчитывать состояния рабочих тел, проводить термодинамические расчеты рабочих процессов в теплосиловых установках и других теплотехнических устройствах, применяемых в отрасли, рассчитывать теплообменные процессы.

**Владеть:** процессом поиска технических решений, методикой выбора рабочих тел, навыками анализа технологических схем производства электрической и тепловой энергии, методикой выбора теплоизоляционных материалов, теплообменных аппаратов, методами интенсификации процессов теплообмена.

## **ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»**

Работа студента над дисциплиной «Энергетические установки» складывается из самостоятельного изучения разделов дисциплины по литературе в соответствии с рабочей программой (приведены ниже) с последующей самопроверкой, индивидуальных консультаций и выполнения контрольной работы. В период сессии по наиболее сложным темам рекомендуется прослушать обзорные лекции, защитить контрольную работу и сдать зачет по всему курсу.

### **Структура дисциплины**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов.

Семестр	Часы учебных занятий					
	Всего	Лекции	Практические занятия	Самостоятельная работа	Контрольная работа	Зачет
4-установка		2				
5 - цикл	108	4	8	94	1	1

### **Самостоятельная работа**

Начинать изучение необходимо со знакомства с учебным планом и программой учебной дисциплины, рассмотрения ее структуры и содержания.

Материал дисциплины рекомендуется изучать последовательно по темам приведенной ниже программы. Переходить к изучению новой темы следует только после полного изучения теоретических вопросов и выполнения самопроверки. Очень важно при знакомстве с новым материалом понять физическую сущность рассматриваемого вопроса.

Для лучшего усвоения материала необходимо осуществлять самопроверку по вопросам программы дисциплины. При возникновении затруднений в процессе изучения предмета или выполнения контрольной работы можно обращаться за письменной или устной консультацией к преподавателю.

В процессе изучения дисциплины «Энергетические установки» студент выполняет одну контрольную работу расчетного характера.

Контрольная работа должна выполняться самостоятельно, поскольку она является одной из важнейших форм методической помощи студентам при изучении дисциплины. Для получения зачета по контрольной работе необходимо правильно выполнить задание в соответствии с вариантом, ответить на вопросы для самопроверки, объяснить полученные результаты и сделать выводы по ним.

## **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ»**

### *1. Энергоресурсы и их использование*

Источники энергии, характеристика возобновляемых и невозобновляемых источников энергии, их запасы, современные способы получения энергии.

### *2. Теоретические основы преобразования теплоты в энергетических установках*

#### *2.1 Основные положения и законы технической термодинамики*

Основные понятия технической термодинамики. Первый закон термодинамики для закрытой системы. Внутренняя энергия, энтальпия, энтропия. Основные термодинамические процессы идеальных газов,  $p$ - $v$  и  $T$ - $s$  диаграммы. Реальные газы, водяной пар. Второй закон термодинамики. Прямые и обратные круговые процессы (циклы). Термодинамические циклы тепловых и холодильных машин. Сущность и формулировки второго закона термодинамики применительно к тепловым и холодильным машинам. Термический КПД и холодильный коэффициент. Термодинамика потока. Выражение первого закона термодинамики для потока применительно к различным термодинамическим устройствам. Термодинамический анализ в компрессорах.

## *2.2. Теоретические основы преобразования энергии в тепловых двигателях*

Цикл Карно. Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Циклы паротурбинных установок (ПТУ). Парогазовый цикл.

## *2.3. Основы теории теплообмена. Теплопроводность, конвективный и лучистый теплообмен. Теплопередача*

Предмет и задачи теории теплообмена. Основные понятия и определения. Виды переноса теплоты: теплопроводность, конвекция и излучение. Теплопроводность, конвективный теплообмен: общие положения, теория подобия; теплоотдача при естественной конвекции, теплоотдача при вынужденной конвекции, теплоотдача при кипении и конденсации. Лучистый теплообмен, основные законы, влияние экранов, излучение и поглощение в газах, «парниковый эффект». Теплопередача. Сложный теплообмен. Теплообменные аппараты.

## *3. Основы преобразования энергии в гидроэнергетических установках*

Основы гидроэнергетики: основные характеристики потока воды. Уравнение неразрывности потока жидкости, уравнение Бернулли. Гидродинамический напор, гидравлическое сопротивление и потери напора жидкости. Основные гидрологические характеристики рек: расход воды, норма и модуль стока, работа водяного потока.

### **Вопросы для самопроверки**

1. Классификация энергетических ресурсов.
2. Основные направления рационального использования энергоресурсов.
3. Что такое термодинамическая система? Рабочее тело?
4. Назовите отличие идеального и реального газов.
5. Назовите параметры состояния рабочего тела (термические  $P, v, T$  и энергетические  $U, H, S$ ).
6. Уравнения состояния идеальных газов (для 1 кг,  $m$  кг, 1 кмоль)
7. Понятие теплоты и работы как форм передачи энергии.
8. Теплоемкость. Виды удельных теплоемкостей, их взаимосвязь. Зависимость теплоемкости от температуры и характера термодинамического процесса.

9. Формулировка и аналитическое выражение 1 закона термодинамики (две формы записи).
10. Работа расширения (сжатия) и методы ее определения. Рабочая  $p-v$ -диаграмма.
11. Теплота как форма передачи энергии. Аналитический и графический методы определения теплоты. Тепловая  $Ts$ -диаграмма.
12. Изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии через термодинамические параметры состояния.
12. Назовите основные термодинамические процессы и изобразите их в термодинамических диаграммах ( $p-v$  и  $T-s$ ).
13. Второй закон термодинамики. Циклы прямые и обратные. Условия осуществления прямых и обратных циклов, термический КПД и холодильный коэффициент. Формулировки 2-го закона термодинамики.
14. Водяной пар. Фазовые термодинамические диаграммы, процесс парообразования в них. В чем отличие процессов парообразования и испарения?
15. Понятие о влажном, сухом и перегретом паре.
16. Объясните, как определить параметры воды и водяного пара в разных состояниях. Что называется степенью сухости пара и степенью влажности? Теплота парообразования.
17. Изображение процессов парообразования в  $p-v$ - и  $Ts$ -диаграммах.
18.  $hs$ -диаграмма водяного пара и ее свойства.
19. Покажите переход некипящей воды в перегретый пар в  $p-v$ - и  $Ts$ -диаграммах. Как вычислить количество теплоты, необходимое для этого перехода?
20. Термодинамика потока газов и паров. Выражение первого закона термодинамики для потока применительно к различным термодинамическим устройствам.
21. Поясните различие между соплом и диффузором. Приведите примеры их использования в технике. Что такое комбинированное сопло, где и с какой целью его применяют?
22. Термодинамический анализ в компрессорах. Одноступенчатое и многоступенчатое сжатие. Работа компрессора в  $p-v$ -диаграмме в различных процессах сжатия.
23. Назовите циклы, которые осуществляются в поршневых двигателях внутреннего сгорания, их изображение в  $p-v$ - и  $Ts$ -диаграммах.



24. Что такое термический КПД цикла теплового двигателя? От чего зависит его величина?
25. Назовите циклы, которые осуществляются в газотурбинных установках, их изображение в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах.
26. Цикл Ренкина на влажном и перегретом паре в  $p\nu$ - и  $Ts$ -диаграммах. Термический КПД и пути его повышения.
27. Назовите способы переноса теплоты и приведите примеры, где они встречаются в технике.
28. Запишите уравнения, по которым производится расчет известных вам видов теплообмена (теплопроводность, теплоотдача, теплопередача, излучение).
29. Назовите способы интенсификации теплопередачи.
30. Назначение тепловой изоляции. Критический диаметр теплоизоляции цилиндрической стенки. Выбор материала тепловой изоляции.
31. Теплообменные аппараты. Назначение. Схемы движения теплоносителей. Напишите уравнения, используемые для расчета этих аппаратов.
32. Назовите основные характеристики потока воды.
33. Понятие гидростатического и гидродинамического напора.
34. Уравнение неразрывности потока, уравнение Бернулли.
35. Что такое гидродинамический напор, гидравлическое сопротивление и потеря напора?
36. Перечислите основные характеристики рек.

### **Список рекомендованных источников**

#### **а) основная литература:**

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. Учебник. М.: ИНФРА-М, 2007 или 2011. – 278с.
2. Быстрицкий Г.Ф. Общая энергетика. Учебное пособие. М.: Издательский центр «Академия». 2005.–208с.
3. Елизаров Д.П. Теплоэнергетические установки электростанций. – М.: Энергоатомиздат. – 2008. – 156с.
4. Александров А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. –176с.

б) дополнительная литература:

5. Волков Э.П., Ведяев В.А., Обрезков В.И. Энергетические установки. Учебник для ВУЗов – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 280с.
6. Основы современной энергетики: учебник для вузов: в 2 т./ под общей редакцией чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. Том 1. Современная теплоэнергетика/ под ред. А.Д. Трухня. – 472с.
7. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. пособие для вузов – 4-е изд., стер. – М.: Аз-book, 2008. – 469 с.
8. Борзов В.П., Шабалина Л.Н. Теплотехника: сборник задач для студентов инженерных специальностей.– Кострома: КГСХА, 2008, 2010. – 158 с.
9. Теплотехника / Под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоиздат, 1991. – 246 с.
10. Ривкин С. Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. – М.: Энергия, 1984.– с.

## **КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА**

Контрольная работа включает решение задач и ответы на вопросы, которые должны быть краткими, лаконичными и исчерпывающими.

### **Правила оформления контрольной работы**

При выполнении контрольной работы необходимо придерживаться указанных ниже правил.

1. Каждый студент выполняет вариант задания в соответствии с номером шифра (две последние цифры).

2. На обложке указываются: название дисциплины, фамилия и инициалы студента, учебный шифр, факультет, профиль подготовки, дата отсылки работы и адрес. На первой странице тетради представляются вариант и исходные данные контрольного задания.

3. Работа оформляется аккуратно в отдельной тетради, страницы тетради нумеруются, текст разборчив. Необходимо оставить поля для пометок и замечаний преподавателя. Обязательно следует переписать условие задачи для своего варианта.

4. Решение задач сопровождать пояснением, формулы должны быть раскрыты, результаты расчетов представлены в единицах СИ с указанием размерности.

5. В работе должны быть ссылки на использованную литературу (оформляется цифрой в квадратных скобках, соответствующей номеру в списке). В конце работы приводится список использованных источников литературы, проставляются дата ее выполнения и роспись студента.

6. Контрольные задания не своего варианта не зачитываются.

Работы, не отвечающие всем перечисленным требованиям, не проверяются, а возвращаются для переделки.

Рекомендуется при выполнении контрольной работы оставлять в конце тетради несколько чистых листов для всех дополнений и исправлений в соответствии с замечаниями преподавателя. Вносить изменения в первоначальный текст работы после ее проверки запрещается. В случае незачета работы, она должна быть выполнена и переоформлена заново.

## **Задачи и вопросы**

### **Задача №1**

Газотурбинная установки (ГТУ) работает по циклу с подводом теплоты при постоянном давлении ( $p = \text{const}$ ). Известны параметры начального состояния  $p_1$  и  $T_1$ , степень повышения давления  $\beta$ , степень предварительного расширения  $\rho$ . Определить параметры в характерных точках цикла, количество подведенной  $q_1$  и отведенной  $q_2$  в цикле теплоты, работу, совершаемую за цикл, и термический КПД цикла. Считать, что рабочее тело – газ, обладающий свойствами идеального газа, массой 1 кг. Теплоемкость рабочего тела принять постоянной.

Значения параметров выбрать из таблицы 1.

Таблица 1 Исходные данные к задаче

Последняя цифра шифра	Газ	$\beta = \frac{p_2}{p_1}$	$\rho = \frac{v_3}{v_2}$	Предпоследняя цифра шифра	$P_1$ , кПа	$T_1$ , К
1	2	3	4	5	6	7
0	Азот N <sub>2</sub>	4,0	2,0	0	80	288
1	Воздух	4,15	2,26	1	90	290
2	Водород H <sub>2</sub>	4,34	2,42	2	100	293
3	Кислород O <sub>2</sub>	5,2	2,5	3	110	300
4	Водяной пар H <sub>2</sub> O	5,5	2,7	4	98	303
5	Гелий He	4,6	2,8	5	95	308
6	Аргон Ar	4,8	2,35	6	97	310
7	Окись углерода CO	4,54	2,14	7	105	313
8	Сернистый газ SO <sub>2</sub>	5,0	2,6	8	88	305
9	Двуокись углерода CO <sub>2</sub>	5,1	2,3	9	85	307

*Методические указания к решению задачи №1*

На рис. 1 представлен цикл ГТУ с изобарным процессом подвода теплоты. Следует разобраться с тем, как осуществляется этот цикл для производства электроэнергии, изобразить схему установки ГТУ с описанием ее элементов, воспользовавшись литературой [1–9]. Значения газовой постоянной указанного рабочего тела и теплоемкостей для него выбрать из приложений 1,2,3. Примеры решения подобных задач приведены в [8].

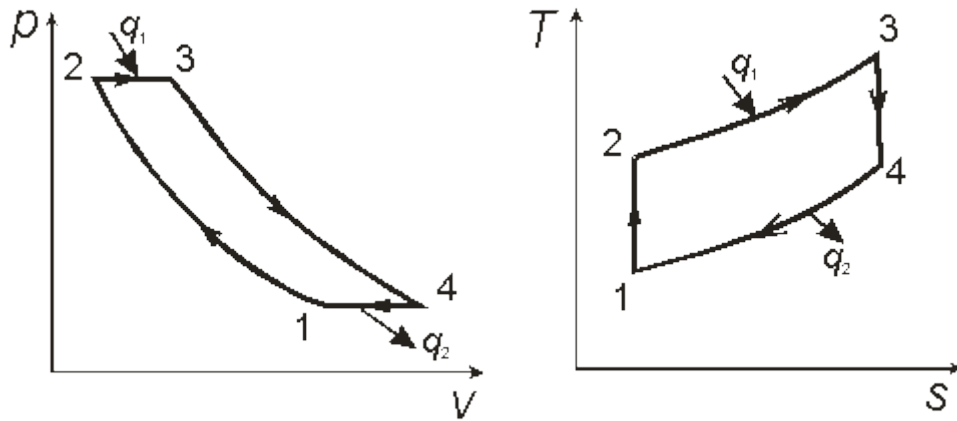


Рис. 1. Цикл ГТУ с подводом теплоты в процессе  $p = \text{const}$  в  $pV$ - и  $Ts$ - диаграммах:

- 1-2 – адиабатное сжатие в компрессоре,
- 2-3 – изобарный подвод теплоты в камере сгорания,
- 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания в газовой турбине,
- 4-1 – изобарный отвод теплоты от продуктов сгорания в атмосферу.

Характеристиками этого цикла являются:

- степень повышения давления воздуха  $\beta = \frac{p_2}{p_1}$   
(или степень сжатия  $\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ );
- степень предварительного расширения  $\rho = \frac{v_3}{v_2}$ .

### Расчет параметров в характерных точках цикла

Для расчета параметров в характерных точках цикла можно воспользоваться уравнением состояния для 1кг газа  $pV = RT$  или соотношением параметров рассматриваемого процесса.

Процесс 1-2:

Из уравнений адиабаты в виде  $pV^k = \text{const}$  определяем  $p_2 = p_1 \varepsilon^k$  или  $p_2 = \beta \cdot p_1$ ;

Из соотношения параметров  $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{k-1}{k}} = \beta^{\frac{k-1}{k}}$  определяем  $T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}$ .

Процесс 2-3:  $p_3 = p_2 = \text{const}$ ,  $T_3/T_2 = v_3/v_2 = \rho$ .

Процесс 3-4 аналогично процессу 1-2.

Процесс 4-1:  $p_4 = p_1 = \text{const}$ ,  $T_4/T_1 = v_4/v_1 = \rho$ .

## Энергетические характеристики цикла

Количество подведенной за цикл теплоты:

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2).$$

Количество отведенной за цикл теплоты:

$$q_2 = c_p (T_4 - T_1).$$

Цикловая работа:  $l_u = q_1 - q_2$ .

Тогда термический КПД этого цикла:

- общее выражение:  $\eta_t = l_u / q_1$  или

- через характеристики цикла:  $\eta_t = 1 - 1 / \beta^{\frac{k-1}{k}}$  или  $\eta_t = 1 - 1 / \varepsilon^{k-1}$

Проверкой правильности решения задачи является совпадение значений термического КПД обеими методами.

Проанализируйте, от чего зависит термический КПД данного цикла.

Дайте ответ на вопросы:

1. Что называется термическим КПД цикла теплового двигателя? Как определяется, от чего зависит?
2. Что такое цикловая работа и от чего зависит ее величина?
3. Объясните, почему термический КПД цикла газотурбинной установки (ГТУ) выше, чем в цикле паротурбинной установки (ПТУ).

## Задача № 2

Выполнить расчет обратимого цикла Ренкина для двух вариантов, считая в первом случае поступающий в турбину пар сухим насыщенным при давлении  $P_1$ , а во втором случае – перегретым с давлением  $P_1$  и температурой  $t_1$ . Давление отработанного пара  $P_2$  для обоих вариантов одинаковое. Расчетом определить количество теплоты, подведенной в цикле  $q_1$ , работу цикла  $l_u$ , термический КПД  $\eta_t$ , потери теплоты в конденсаторе турбины  $q_2$  и удельный расход пара на выработку 1 кВт·ч электроэнергии  $d$ . Определить также степень сухости отработанного пара  $x_2$  в каждом варианте. Изобразить схему ПТУ и цикл Ренкина в  $Pv$ -,  $Ts$ - и  $hs$ -диаграммах. Данные выбрать из таблицы 2.

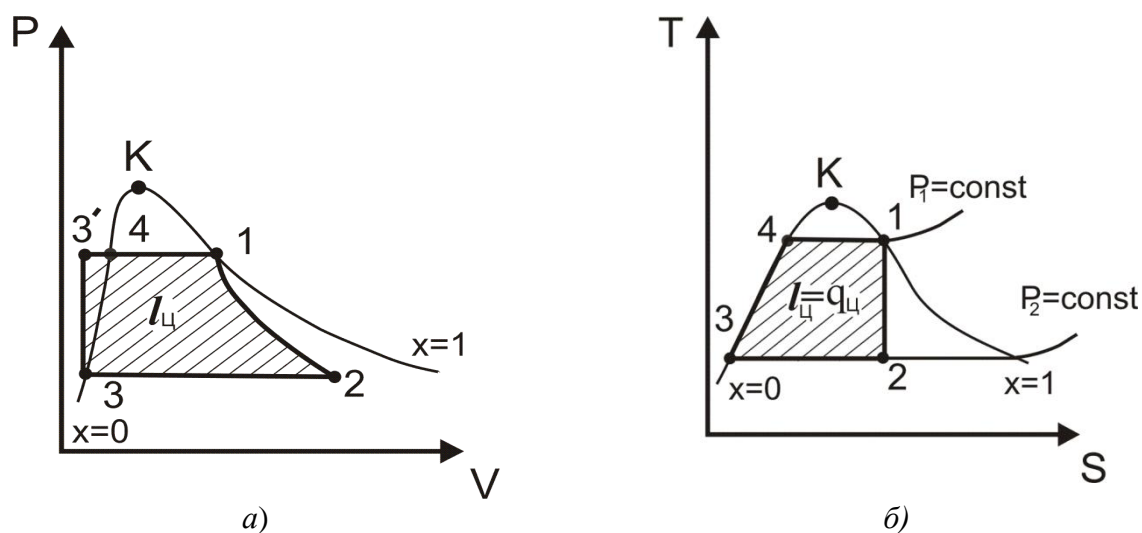
Таблица 2 Исходные данные для решения задачи

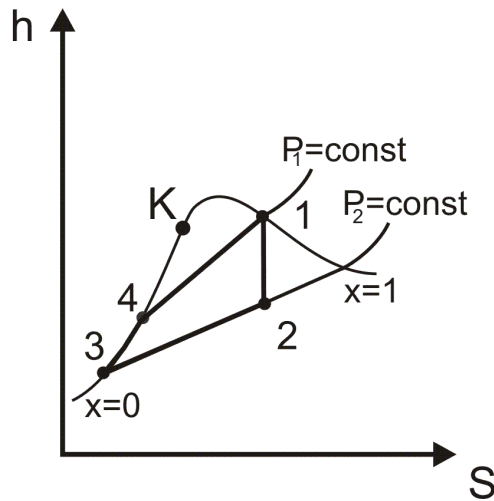
Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1$ , МПа	8,0	9,0	9,5	10	11	12	13	14	15	16
$P_2$ , кПа	3,0	3,5	4,0	7,0	6,5	6,0	7,5	4,5	5,5	5,0
Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1$ , °С	480	490	500	510	520	530	540	550	560	570

Методические указания к решению задачи №2

На рис. 2 представлен цикл паротурбинной установки (цикл Ренкина) на насыщенном паре. Изобразите схему ПТУ, дайте ее краткое описание, разобравшись с тем, как осуществляется выработка электроэнергии в этом цикле [1–9]. Для второго варианта изобразите в диаграммах  $p-v$  и  $T-s$  цикл Ренкина на перегретом паре.

Задачу решайте с помощью  $h-s$ -диаграммы, таблиц водяного пара [10] или приложений 4,5, либо используя компьютерную программу «Диаграмма  $HS$  для воды и водяного пара».





в)

Рис. 2. Теоретический цикл Ренкина на насыщенном паре:

а) в  $pV$ -диаграмме, б) в  $Ts$ -диаграмме, в) в  $hs$ -диаграмме

На диаграммах (рис. 2) цифрами обозначены следующие процессы:

1-2 — адиабатное расширение пара в турбине;

2-3 — изобарно-изотермическая конденсация влажного пара в конденсаторе при  $P_2 = \text{const}$  и  $t_2 = \text{const}$ ;

3-3' — адиабатное сжатие воды в насосе, т.к. вода практически не сжимается, этот процесс можно считать и изохорным (данный процесс показан только на  $pV$  – диаграмме);

3(3')-4 — изобарный процесс подогрева воды в экономайзере парогенератора при  $P_1 = \text{const}$ ;

4-1 — изобарно-изотермический процесс парообразования в парогенераторе при  $P_1 = \text{const}$  и  $t_1 = \text{const}$ .

Точки 3 и 3' в  $Ts$ -диаграмме и  $hs$ -диаграмме совпадают, так как при сжатии воды в насосе их значение меняется очень незначительно.

В первом варианте рассчитывается цикл ПТУ при работе на сухом насыщенном паре с начальным давлением  $P_1$ , степенью сухости  $x_1=1$  и давлением пара после турбины  $P_2$ . Для решения задачи достаточно определить энтальпии пара перед турбиной  $h_1$ , на выходе из нее  $h_2$  и энтальпию конденсата  $h_3$ .

Энтальпия точки 1 определяется из таблицы водяного пара в состоянии насыщения [10] или из приложения 4 по давлению  $P_1$ . Параметры влажного насыщенного пара в точке 2 находятся из построения процесса адиабатного расширения пара в турбине по  $hs$ -диаграмме. Для этого из точки 1 опускается изоэнтропа ( $s_1=s_2$ ) до



пересечения с линией  $P_2 = \text{const}$ . Точка пересечения этих линий соответствует точке 2 и по диаграмме определяются значения  $x_2$  и  $h_2$ .

Можно энтальпию пара в точке 2 определить расчетным путем:

$$h_2 = h' + x_2(h'' - h').$$

Для этого сначала необходимо определить степень сухости пара в точке 2 по уравнению:  $x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'}$ ,

где  $s_2 = s_1$ ,

$s'$ ,  $s''$  — соответственно энтропия конденсата и сухого насыщенного пара, выбираются по давлению  $P_2$  из приложения 4 или таблиц [10],

$h'$ ,  $h''$  — энтальпия конденсата и сухого насыщенного пара, выбираются по давлению  $P_2$  из приложения 4 или таблиц [10].

Энтальпия конденсата в точке 3 выбирается по давлению в конденсаторе  $P_2$  из приложения 4 или таблиц [10], т. е.  $h_3 = h'$ .

Количество подведенной в цикле теплоты (в парогенераторе):

$$q_1 = h_1 - h_3.$$

Отведенная в цикле теплота (потери в конденсаторе):

$$q_2 = h_2 - h_3.$$

Работа пара за цикл:  $l_{\text{ц}} = q_1 - q_2 = h_1 - h_2$ .

Термический КПД цикла Ренкина:

$$\eta_t = \frac{l_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}.$$

Удельный расход пара на выработку 1 кВт·ч электроэнергии:

$$d_0 = \frac{3600}{h_1 - h_2}.$$

Во втором варианте рассчитывается цикл ПТУ при работе на перегретом паре с начальным давлением  $P_1$ , температурой  $t_1$  и давлением пара после турбины  $P_2$ .

Решение второго варианта выполняется аналогично, только энтальпию перегретого пара перед турбиной (точка 1) определяют по  $P_1$  и  $t_1$  из приложения 5 или по  $hs$ -диаграмме.

На основе расчета проанализируйте характер изменения термического КПД цикла и удельного расхода пара.

Дайте ответ на вопросы:

1. В чем отличие пара влажного насыщенного, сухого насыщенного и перегретого при одинаковом давлении?
2. Пар какого состояния целесообразней использовать в паротурбинных установках и почему?
3. Опишите методы, используемые для повышения термического КПД цикла ПТУ (цикла Ренкина).

### Задача №3

На внутренней поверхности кирпичной стены здания площадью  $F$  ( $\text{м}^2$ ) толщиной  $0,51\text{м}$  поддерживается температура  $t_1 = 18^\circ\text{C}$ . Для этого используется котел. Теплота сгорания топлива в котле  $Q_T$  (МДж/кг) и КПД котла  $\eta_K$  известны. Стены здания утеплены слоем изоляции толщиной  $\delta_{ИЗ}$  (мм) с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{ИЗ}$  (Вт/м·К). Известна температура наружного воздуха  $t_{НВ}$  ( $^\circ\text{C}$ ) и коэффициент теплоотдачи от стены здания к наружному воздуху  $\alpha_2 = 6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Определить потери теплоты через стены здания  $Q$  (Вт), температуру на поверхности изоляции  $t_3$  ( $^\circ\text{C}$ ) и часовой расход топлива  $m_T$  (кг/ч). Коэффициент теплопроводности кирпичной стены принять  $\lambda_K = 0,76 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ . Построить график изменения температуры в двухслойной стенке здания в системе координат  $t-x$ .

Данные для решения задачи выбрать из таблицы 3.

Таблица 3 Исходные данные к задаче

Последняя цифра шифра	$\delta_{ИЗ}$ , мм	$\lambda_{ИЗ}$ , Вт/м·К	$F$ , $\text{м}^2$	Предпоследняя цифра шифра	$Q_T$ , МДж/кг	$\eta_K$	$t_{НВ}$ , $^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	20	0,15	120	0	27	0,70	- 22
1	25	0,12	150	1	29	0,65	- 19
2	30	0,11	200	2	40	0,60	- 23

1	2	3	4	5	6	7	8
3	35	0,163	180	3	39	0,72	- 18
4	40	0,05	220	4	44	0,74	- 21
5	45	0,08	160	5	41	0,68	- 24
6	50	0,098	250	6	38	0,69	- 17
7	55	0,064	280	7	42	0,73	- 20
8	60	0,047	190	8	30	0,63	- 16
9	65	0,08	240	9	43	0, 67	-25

### *Методические указания к решению задачи №3*

Решение задач на теплообмен следует начинать с понимания, какой вид теплообмена в данном случае имеет место. Перенос теплоты через стену здания при неизменных температурах на ее поверхности соответствует задаче стационарной теплопроводности, а далее этот же поток теплоты отдается от поверхности изоляции наружному воздуху с температурой  $t_{нв}$ . Поэтому для определения потерь теплоты через стены здания выбираем уравнение, описывающее теплопроводность через двухслойную плоскую стенку заданной поверхности  $F$  и уравнение, описывающее процесс теплоотдачи от этой поверхности. Совместное решение этих двух уравнений исключает неизвестную температуру на наружной поверхности изоляции и позволит определить поток теплоты, теряемой зданием. В дальнейшем, определив величину теплопотерь, можно рассчитать температуру на поверхности изоляции  $t_3$  по уравнению теплопроводности или по уравнению теплоотдачи. Расход топлива можно определить из условия, что теплота, выделенная при горении топлива в котле эквивалентна теплопотерям:

$$m_T Q_T \eta_K = Q_{П} = Q.$$

Примеры решения задач приведены в [8]. При построении графика изменения температуры, учтите теплопроводность каждого слоя.

Ответить на вопросы:

1. Дайте понятие процесса теплопроводности, запишите основной закон теплопроводности.
2. Объясните, от чего зависит изменение температуры в теле, почему в слое кирпичной кладки и слое изоляции температура изменяется по-разному.
3. Запишите уравнение для расчета процесса теплоотдачи и объясните, что влияет на интенсивность этого процесса.

#### Задача №4

Кипящая вода воспринимает теплоту от дымовых газов парогенератора через стальную стенку толщиной 15мм. Известны: температура дымовых газов  $t_{Г}$  °С, температура воды  $t_{В}$  °С, коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_1$ , от стенки к кипящей воде  $\alpha_2$ , коэффициент теплопроводности стали  $\lambda = 50$  Вт/(м·К). При эксплуатации на поверхности стенки со стороны дымовых газов появилось отложение сажи толщиной  $\delta_c$ , а со стороны воды слой накипи толщиной  $\delta_n$ . Коэффициенты теплопроводности сажи  $\lambda_c = 0,12$  Вт/(м·К) и накипи  $\lambda_n = 1,3$  Вт/(м·К).

Вычислить тепловой поток, передаваемый через 1м<sup>2</sup> чистой стенки и стенки, покрытой слоями сажи и накипи. Сравнить, как изменятся температуры на поверхности стенки. Построить график распределения температуры в системе координат  $t-x$ .

Данные для решения задачи выбрать из таблицы 4.

Таблица 4 Исходные данные к задаче

Последняя цифра шифра	$t_{Г}, ^\circ\text{C}$	$t_{В}, ^\circ\text{C}$	$\alpha_1, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	$\alpha_2, \text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$	Предпоследняя цифра шифра	$\delta_c, \text{мм}$	$\delta_n, \text{мм}$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	800	200	90	3500	0	0,9	0,5
1	850	220	100	3700	1	1,0	0,8
2	900	240	110	3900	2	1,3	0,9
3	950	260	120	4000	3	1,5	1,0
4	1000	280	130	4100	4	1,8	1,1

5	1050	250	140	4200	5	2,1	1,3
6	1100	300	150	4300	6	1,9	1,2
7	1150	320	160	4400	7	2,0	1,5
8	1200	340	170	4500	8	2,3	1,4
9	1250	350	180	4600	9	2,4	1,6

#### *Методические указания к решению задачи №4*

В задаче рассматривается процесс теплопередачи от дымовых газов к воде для двух случаев: чистой стенки и покрытой слоями сажи и накипи. Решение задачи сводится к определению коэффициента теплопередачи через однослойные и многослойные плоские стенки. С решением подобных задач можно ознакомиться в [8]. Определив поток теплоты, передаваемый от газов к воде, можно найти и температуры на поверхности стенки. Обратите внимание, как дополнительные слои сажи и накипи скажутся на температуре стенки котла. При построении графика изменения температуры в каждом слое, учтите его теплопроводность.

Дайте ответ на вопросы:

1. Что называется процессом теплопередачи?
2. Объясните, как поэтапно осуществляется перенос теплоты от дымовых газов к воде в процессе теплопередачи, и запишите уравнения для каждого этапа.
3. Назовите несколько способов интенсификации теплопередачи.

#### **Задача №5**

Определить потери теплоты за счет излучения с поверхности стального паропровода диаметром  $d$  мм, длиной 1м, наружная температура которого  $t_1$  °С, степень черноты  $\varepsilon_1$ . Обратным излучением окружающих тел можно пренебречь, то есть рассмотреть излучение в неограниченное пространство.

Определить, насколько изменятся потери теплоты паропроводом, если он покрыт изоляцией, имеющей температуру на поверхности  $t_{из}$  °С, степень черноты  $\varepsilon_{из}$ . Температуру окружающих предметов для обоих случаев принять равной  $t_2$  °С.

Данные для решения задачи выбрать из таблицы 5.

Таблица 5 Исходные данные для решения задачи

Последняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	257	287	307	337	357	377	407	447	467	507
$t_{\text{из}}, ^\circ\text{C}$	47	40	43	41	45	49	44	42	46	48
$\varepsilon_1$	0,7	0,78	0,71	0,69	0,77	0,75	0,72	0,74	0,73	0,76
Предпоследняя цифра шифра	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$d, \text{мм}$	250	280	300	320	340	360	240	260	350	400
$\varepsilon_{\text{из}}$	0,88	0,9	0,92	0,89	0,91	0,87	0,86	0,85	0,93	0,84
$t_2, ^\circ\text{C}$	20	21	22	27	23	25	29	30	24	26

*Методические указания к решению задачи №5*

При расчете теплообмена излучением в неограниченное пространство в качестве расчетной поверхности теплообмена  $F$  принять боковую поверхность паропровода длиной 1м; приведенную степень черноты системы тел, обменивающихся лучистой энергией,  $\varepsilon_{\text{пр}}$  принять равной степени черноты паропровода  $\varepsilon_1$ , а при покрытии его изоляцией соответственно  $\varepsilon_{\text{из}}$ . Примеры решения задач приведены в [8].

Дайте ответ на вопросы:

1. Как осуществляется теплообмен излучением?
2. От чего зависит собственное излучение любого тела? Ответ подтвердите записью соответствующего закона излучения.
3. Сформулируйте и запишите математическое выражение закона Кирхгофа для излучения тел.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

#### Приложение 1

##### *Характеристики газов*

Газ	Химическая формула	Молекул. масса $\mu$ , кг/кмоль	Плотность при н.у. $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Показатель адиабаты $k$	Газовая постоянная $R$ , Дж/кг·К
воздух	—	28,96	1,29	1,4	287
гелий	He	4,0026	0,1785	1,67	2077
водород	H <sub>2</sub>	2,0159	0,08987	1,4	4124
азот	N <sub>2</sub>	28,0134	1,2505	1,4	296,9
кислород	O <sub>2</sub>	31,9968	1,42895	1,4	259,8
диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,0079	1,9768	1,3	188,9
оксид углерода	CO	28,009	1,2500	1,4	296,8
метан	CH <sub>4</sub>	16,00	0,7150	1,3	519,6
водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,015	0,804	1,3	461,5

#### Приложение 2

##### *Мольные теплоемкости при постоянном объеме $\mu C_V$ и постоянном давлении $\mu C_p$ , кДж/кмоль·К*

Газ	$\mu C_V$	$\mu C_p$
одноатомный	12,6	20,9
двухатомный	20,9	29,3
трех- и многоатомный	29,3	37,7

Приложение 3

*Средние массовые изобарные и изохорные теплоемкости  
некоторых газов, кДж/кг·К*

Темпера-тура, °С	Азот (N <sub>2</sub> )		Кислород (O <sub>2</sub> )		Окись углерода (CO)		Водород (H <sub>2</sub> )	
	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>
0	1,0392	0,7423	0,9148	0,6548	1,0396	0,7427	14,195	10,071
100	1,0404	0,7427	0,9232	0,6632	1,0417	0,7448	14,353	10,228
200	1,0434	0,7465	0,9353	0,6753	1,0463	0,7494	14,421	10,297
300	1,0488	0,7519	0,9500	0,6900	1,0538	0,7570	14,446	10,322
400	1,0567	0,7599	0,9651	0,7051	1,0634	0,7666	14,477	10,353
500	1,0660	0,7691	0,9793	0,7193	1,0748	0,7775	14,509	10,384
600	1,0760	0,7792	0,9928	0,7327	1,0861	0,7892	14,542	10,417
700	1,0869	0,7900	1,0048	0,7448	1,0978	0,8009	14,587	10,463
800	1,0974	0,8005	1,0157	0,7557	1,1091	0,7122	14,641	10,517
900	1,1078	0,8110	1,0258	0,7658	1,1200	0,7231	14,706	10,581
1000	1,1179	0,8210	1,0350	0,7750	1,1304	0,7336	14,776	10,652

Темпера-тура, °С	Водяной пар (H <sub>2</sub> O)		Сернистый газ (SO <sub>2</sub> )		Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )		Воздух	
	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>	<i>C<sub>p</sub>m</i>	<i>C<sub>v</sub>m</i>
0	1,8594	1,9380	0,607	0,477	0,8148	0,6259	1,0036	0,7164
100	1,9728	1,4114	0,636	0,507	0,8658	0,6770	1,0061	0,7193
200	1,7927	1,4323	0,662	0,532	0,9102	0,7214	1,0115	0,7243
300	1,9192	1,3457	0,687	0,557	0,9487	0,7599	1,0191	0,7319
400	1,9477	1,4863	0,708	0,578	0,9826	0,7938	1,0283	0,7415
500	1,9778	1,5160	0,724	0,595	1,0128	0,8240	1,0387	0,7519
600	2,0092	1,5474	0,737	0,607	1,0396	0,8508	1,0496	0,7624
700	2,0419	1,5805	0,754	0,624	1,0639	0,7846	1,0605	0,7733
800	2,0754	1,6140	0,762	0,632	1,0852	0,8964	1,0710	0,7842
900	2,1097	1,6483	0,775	0,645	1,1045	0,9157	1,0815	0,7942
1000	2,1436	1,6823	0,783	0,653	1,1225	0,9332	1,0907	0,8039



Приложение 4

*Термодинамические свойства воды и водяного пара  
в состоянии насыщения*

P, МПа	t, °C	$\nu'$	$\nu''$	$h'$	$h''$	r	$s'$	$s''$
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,001	6,98	0,0010001	129,208	29,33	2513,8	2484,5	0,1060	8,9756
0,002	17,51	0,0010012	67,006	73,45	2533,2	2459,8	0,2606	8,7236
0,0025	21,09	0,0010020	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431
0,003	24,098	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,0035	26,69	0,0010033	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224
0,004	28,98	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,0045	31,03	0,0010046	31,142	129,98	2557,8	2427,8	0,4507	8,4327
0,005	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,0055	34,60	0,0010058	25,772	144,91	2564,2	2419,3	0,4995	8,3613
0,006	36,18	0,0010064	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,007	39,02	0,0010074	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760
0,010	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,020	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
0,030	69,12	0,0010233	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,040	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,050	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,075	91,78	0,0010375	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
0,10	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
0,12	104,81	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	2244,4	1,3609	7,2996
0,14	109,32	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	2232,4	1,4109	7,2480

0,16	113,32	0,0010547	1,0917	457,35	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
0,18	116,93	0,0010579	0,97775	490,70	2702,1	2211,4	1,4944	7,1638
0,20	120,32	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
0,25	127,43	0,0010675	0,71881	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
0,30	113,54	0,0010735	0,60586	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
0,35	138,88	0,0010789	0,52425	584,3	2732,5	2148,2	1,7373	6,9414
0,40	143,62	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
0,5	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,4	2108,4	1,8604	6,8215
0,6	158,84	0,0011009	0,31556	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
0,7	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
0,8	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
0,9	175,36	0,0011213	0,21484	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
1,0	179,88	0,0011274	0,19430	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5857
1,5	198,28	0,0011538	0,13165	844,7	2790,4	1945,7	2,3144	6,4418
2,0	212,37	0,0011766	0,09953	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
3,0	233,84	0,0012163	0,06662	1008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
4,0	250,33	0,0012521	0,04974	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
5,0	263,92	0,0012858	0,03941	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
6,0	275,66	0,0013187	0,03241	1213,9	2783,3	1569,4	3,0277	5,8878
7,0	285,80	0,0013514	0,02734	1267,7	2771,4	1503,7	3,1255	5,8126
8,0	294,98	0,0013843	0,02349	1317,5	2757,5	1440,0	3,2083	5,7430
8,5	299,24	0,0014010	0,02189	1341,2	2749,9	1408,7	3,2487	5,7098
9,0	303,31	0,0014179	0,02046	1364,2	2741,2	1377,6	3,2875	5,6773
9,5	307,22	0,0014351	0,01917	1386,7	2733,4	1346,7	3,3251	5,6456
10,0	310,96	0,0014526	0,01800	1408,6	2724,4	1315,8	3,3616	5,6143
10,5	314,57	0,0014704	0,01694	1430,1	2715,2	1285,1	3,3970	5,5835

11,0	318,04	0,0014887	0,01597	1451,2	2705,4	1254,2	3,4316	5,5531
11,5	321,39	0,0015074	0,01507	1472,1	2695,3	1223,2	3,4654	5,5229
12,0	324,64	0,0015267	0,01425	1492,6	2684,8	1192,2	3,4986	5,4930
12,5	327,77	0,0015465	0,01348	1512,9	2673,8	1160,9	3,5312	5,4631
13,0	330,81	0,0015670	0,01277	1533,0	2662,4	1129,4	3,5633	5,4333
13,5	333,76	0,0015883	0,01211	1552,9	2650,6	1097,7	3,5949	5,4035
14,0	336,63	0,0016104	0,01149	1572,8	2638,3	1065,5	3,6262	5,3737
14,5	339,41	0,0016335	0,01091	1592,6	2625,5	1032,9	3,6573	5,3435
15,0	342,12	0,0016580	0,01035	1612,2	2611,6	999,4	3,6877	5,3122
15,5	344,75	0,0016834	0,009983	1631,8	2597,5	965,7	3,7181	5,2812
16,0	347,32	0,0017101	0,009330	1651,5	2582,7	931,2	3,7486	5,2496
17,0	352,26	0,0017690	0,008401	1691,6	2550,8	859,2	3,8103	5,1841
18,0	356,96	0,0018380	0,007534	1733,4	2514,4	781,0	3,8739	5,1135
19,0	361,44	0,0019231	0,006700	1778,2	2470,1	691,9	3,9417	5,0321
20,0	365,71	0,0020380	0,005837	1828,8	2413,8	585,0	4,0181	4,9338
21,0	369,79	0,002218	0,005006	1892,2	2340,2	448,0	4,1137	4,8106
22,0	373,68	0,002675	0,003757	2007,7	2192,5	184,8	4,2891	4,5748

Приложение 5

*Термодинамические свойства воды и водяного пара*

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$P = 8,0 \text{ МПа}$			$P = 9,0 \text{ МПа}$			$P = 10,0 \text{ МПа}$		
	$t_n = 294,98 \text{ }^\circ\text{C}$			$t_n = 303,31 \text{ }^\circ\text{C}$			$t_n = 310,96 \text{ }^\circ\text{C}$		
	$\nu,$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\nu,$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\nu,$ $\frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$	$h,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$s,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0009962	8,1	0,0004	0,0009958	9,1	0,0005	0,0009953	10,1	0,0005
100	0,0010396	425,0	1,3007	0,0010391	425,8	1,3000	0,0010386	426,5	1,2992
200	0,0011500	855,1	2,3207	0,0011490	855,5	2,3191	0,0011480	855,9	2,3176
300	0,02425	2785,4	5,7918	0,0014022	1344,9	3,2539	0,0013978	1343,7	3,2429
400	0,03431	3140,1	6,3670	0,02993	3119,7	6,2891	0,02641	3098,5	6,2158
410	0,03511	3167,7	6,4076	0,03067	3148,5	6,3316	0,02711	3128,7	6,2605
420	0,03589	3194,7	6,4469	0,03139	3176,7	6,3725	0,02779	3158,1	6,3031
430	0,03665	3221,2	6,4849	0,03210	3204,2	6,4120	0,02845	3186,7	6,3442
440	0,03741	3247,3	6,5218	0,03280	3231,2	6,4502	0,02910	3214,8	6,3837
450	0,03815	3273,1	6,5577	0,03348	3257,9	6,4872	0,02974	3242,2	6,4220
460	0,03888	3298,6	6,5928	0,03415	3284,1	6,5233	0,03036	3269,3	6,4591
470	0,03960	3323,9	6,6270	0,03481	3310,1	6,5584	0,03098	3296,0	6,4953
480	0,04031	3340,0	6,6605	0,03546	3335,7	6,5927	0,03158	3322,3	6,5305
490	0,04102	3373,8	6,6933	0,03611	3361,2	6,6263	0,03218	3348,3	6,5648
500	0,04172	3398,5	6,7254	0,03675	3386,4	6,6592	0,03277	3374,1	6,5984
510	0,04241	3423,1	6,7570	0,03738	3411,5	6,6914	0,03335	3399,7	6,6313
520	0,04309	3447,6	6,7881	0,03800	3436,4	6,7230	0,03392	3425,1	6,6635

530	0,04377	3471,9	6,8186	0,03862	3461,2	6,7541	0,03449	3450,3	6,6951
540	0,04445	3496,2	6,8486	0,03923	3485,9	6,7846	0,03505	3475,4	6,7262
550	0,04512	3520,4	6,8783	0,03984	3510,5	6,8147	0,03561	3500,4	6,7568
560	0,04578	3544,6	6,9075	0,04044	3535,0	6,8147	0,03616	3525,4	6,7869
570	0,04645	3568,7	6,9363	0,04104	3559,5	6,8444	0,03671	3550,2	6,8165
580	0,04710	3592,8	6,9646	0,04163	3583,9	6,8736	0,03726	3574,9	6,8456
590	0,04776	3616,8	6,9926	0,04222	3608,2	6,9023	0,03780	3599,5	6,8743
600	0,04841	3640,7	7,0201	0,04281	3632,4	6,9585	0,03833	3624,0	6,9025

$t, ^\circ\text{C}$	$P = 11,0 \text{ MPa}$			$P = 12,0 \text{ MPa}$			$P = 13,0 \text{ MPa}$		
	$t_H = 318,04 ^\circ\text{C}$			$t_H = 324,64 ^\circ\text{C}$			$t_H = 330,81 ^\circ\text{C}$		
$l$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0009948	11,1	0,0006	0,0009943	12,1	0,0006	0,0009938	13,1	0,0006
100	0,0010381	427,2	1,2984	0,0010376	428,01	1,2977	0,0010371	428,8	1,2969
200	0,0011470	856,4	2,3161	0,0011461	856,8	2,3146	0,0011451	857,2	2,3131
300	0,001394	1342,6	3,2450	0,0013895	1341,5	3,2407	0,0013855	1340,5	3,2365
400	0,02351	3076,4	6,1460	0,02108	3053,3	6,0787	0,01901	3029,3	6,0132
410	0,02418	3108,2	6,1929	0,02173	3086,9	6,1282	0,01964	3064,8	6,0655
420	0,02483	3138,9	6,2376	0,02235	3119,1	6,1750	0,02025	3098,6	6,1147
430	0,02546	3168,8	6,2803	0,02296	3150,2	6,2196	0,02083	3131,1	6,1613
440	0,02607	3197,8	6,3214	0,02354	3180,4	6,2622	0,02139	3162,6	6,2057
450	0,02667	3226,2	6,3609	0,02411	3209,9	6,3032	0,02194	3193,1	6,2482
460	0,02726	3254,1	6,3992	0,02467	3238,6	6,3427	0,02247	3222,8	6,2890
470	0,02784	3281,6	6,4364	0,02521	3266,9	6,3810	0,02299	3251,9	6,3284
480	0,02840	3308,6	6,4725	0,02575	3294,6	6,4181	0,02350	3280,4	6,3666
490	0,02896	3335,3	6,5077	0,02627	3322,0	6,4542	0,02400	3308,5	6,4036

500	0,02951	3361,6	6,5420	0,02679	3349,0	6,4893	0,02448	3336,1	6,4395
510	0,03005	3387,8	6,5756	0,02730	3375,6	6,5236	0,02496	3363,4	6,4746
520	0,03058	3413,7	6,6085	0,02780	3402,1	6,5571	0,02544	3390,3	6,5088
530	0,03111	3439,4	6,6407	0,02829	3428,2	6,5899	0,02590	3417,0	6,5422
540	0,03163	3464,9	6,6723	0,02878	3454,2	6,6220	0,02637	3443,4	6,5749
550	0,03215	3490,3	6,7034	0,02926	3480,0	6,6536	0,02682	3469,7	6,6071
560	0,03266	3515,6	6,7340	0,02974	3505,7	6,6847	0,02727	3495,8	6,6386
570	0,03317	3540,8	6,7640	0,03022	3531,3	6,7152	0,02772	3521,7	6,6695
580	0,03367	3565,8	6,7935	0,03068	3556,7	6,7451	0,02816	3547,5	6,6999
590	0,03417	3590,7	6,8225	0,03115	3581,9	6,7745	0,02859	3573,0	6,7297
600	0,03467	3615,5	6,8511	0,03161	3607,0	6,8034	0,02903	3598,4	6,7590

$t, ^\circ\text{C}$	$P = 14,0 \text{ МПа}$			$P = 15,0 \text{ МПа}$			$P = 16,0 \text{ МПа}$		
	$t_H = 336,63 \text{ }^\circ\text{C}$			$t_H = 342,12 \text{ }^\circ\text{C}$			$t_H = 347,32 \text{ }^\circ\text{C}$		
$l$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	0,0009933	14,1	0,0007	0,0009928	15,1	0,0007	0,0009924	16,1	0,0008
100	0,0010366	429,5	1,2961	0,0010361	430,3	1,2954	0,0010356	431,0	1,2946
200	0,0011442	857,7	2,3117	0,0011432	858,1	2,3102	0,0011423	858,6	2,3087
300	0,0013816	1339,5	2,2324	0,0013779	1338,6	3,2284	0,0013742	1337,7	3,2245
400	0,01722	3004,0	5,9488	0,01566	2977,6	5,8851	0,01427	2949,7	5,8215
410	0,01784	3041,7	6,0044	0,01627	3017,7	5,9442	0,01488	2992,5	5,8847
420	0,01844	3077,4	6,0562	0,01685	3055,3	5,9990	0,01546	3032,5	5,9427
430	0,01900	3111,4	6,1050	0,01741	3091,1	6,0502	0,01600	3070,5	5,9965
440	0,01954	3144,2	6,1512	0,01794	3125,2	6,0984	0,01652	3105,8	6,0470
450	0,02007	3175,8	6,1953	0,01845	3158,2	6,1443	0,01702	3140,0	6,0947
460	0,02058	3206,6	6,2376	0,01894	3190,0	6,1880	0,01750	3173,0	6,1400

470	0,02108	3236,6	6,2782	0,01942	3221,0	6,2300	0,01797	3205,0	6,1834
480	0,02157	3265,9	6,3174	0,01989	3251,2	6,2704	0,01842	3236,2	6,2250
490	0,02204	3294,7	6,3554	0,02035	3280,7	6,3093	0,01886	3266,5	6,2650
500	0,02251	3323,0	6,3922	0,02079	3309,7	6,3471	0,01929	3296,3	6,3038
510	0,02297	3350,9	6,4281	0,02123	3338,3	6,3838	0,01971	3325,4	6,3413
520	0,02342	3378,4	6,4630	0,02166	3366,4	6,4194	0,02013	3354,2	6,3777
530	0,02386	3405,6	6,4971	0,02208	3394,1	6,4542	0,02053	3382,4	6,4131
540	0,02430	3432,5	6,5304	0,02250	3421,5	6,4881	0,02093	3410,4	6,4477
550	0,02473	3459,2	6,5631	0,02291	3448,7	6,5214	0,02132	3438,0	6,4816
560	0,02515	3485,8	6,5951	0,02332	3475,6	6,5539	0,02171	3465,4	6,5146
570	0,02557	3512,1	6,6265	0,02372	3502,3	6,5858	0,02209	3492,5	6,5470
580	0,02599	3538,2	6,6573	0,02411	3528,8	6,6170	0,02247	3519,4	6,5787
590	0,02640	3564,1	6,6875	0,02450	3555,1	6,6476	0,02284	3546,0	6,6097
600	0,02681	3589,8	6,7172	0,02489	3581,2	6,6776	0,02321	3572,4	6,6401