

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Ю.А. Рахманов**

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ  
И ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**Учебно-методическое пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2016**

УДК 697.32.001

**Рахманов Ю.А.** Энергетические установки и экология энергосистем: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 51 с.

Даны методические указания, вопросы для самоподготовки, задания для контрольных работ, справочные материалы при изучении дисциплины «Энергетические установки и экология энергосистем».

Предназначено для студентов заочного обучения направления 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения квалификации бакалавр.

**Рецензент: доктор техн. наук, проф. А.В. Цыганков**

**Рекомендовано к печати Советом факультета пищевых биотехнологий и инженерии, протокол № 9 от 27 мая 2016 г.**



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016

© Рахманов Ю.А., 2016

## ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

Настоящие методические указания (МУ) составлены для студентов факультета заочного обучения направления подготовки 16.03.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения квалификации бакалавр.

Студенты изучают следующие разделы дисциплины «Энергетические установки и экология энергосистем»:

- теплогенерирующие установки;
- теплоэнергетические (тепловые) установки;
- системы теплоснабжения;
- экологические проблемы энергетики.

Необходимыми условиями для освоения дисциплины являются: знание основных законов физики, химии, математики, вычислительной техники, механики жидкостей и газов, экологии, термодинамики и теплопередачи; умение использовать основные законы естественных наук в профессиональной деятельности для решения типовых и инженерных задач; владение навыками использования научно-технической и справочной литературы при решении прикладных задач.

Дисциплина изучается в пятом и шестом семестрах третьего курса и служит основой для освоения профессиональных дисциплин: «Технические основы энергосбережения в зданиях и сооружениях», «Современные проблемы экологии в машиностроении», «Тепловые насосы», «Установки систем жизнеобеспечения».

Целью освоения дисциплины является достижение следующих результатов образования (РО), среди них –

**знания:**

*на уровне представлений:*

- общие теоретические положения проектирования энергетических установок;
- принципы взаимного и непрерывного преобразования теплоты и работы;
- основные схемы современных энергетических установок;
- негативные факторы воздействия энергетических установок на окружающую среду;

*на уровне воспроизведения:*

- основные уравнения механики сплошных сред, тепло- и массообмена машин и аппаратов энергетических установок;
- идеальные и реальные термодинамические циклы современных энергетических машин и установок;

*на уровне понимания:*

- методы расчета и подбора энергетического оборудования;
- методы рационального использования, управления работой и технического обслуживания энергетического оборудования;

**умения:**

*теоретические:*

- определять нагрузки энергетических установок;

*практические:*

- рассчитывать и подбирать необходимое энергетическое оборудование;
- составлять схемы энергетических установок и эксплуатировать их в производственных условиях;

**навыки:**

- проектирования энергетических установок;
- определения основных параметров, характеризующих техническое состояние и режимы работы энергетических установок;
- анализа режимов работы энергетических установок с целью определения причин отклонения действительных значений их параметров от рекомендуемых значений;
- проведения операций по обслуживанию промышленных энергетических установок.

Перечисленные РО являются основой для формирования следующих компетенций:

- готовность выполнять расчетно-экспериментальные работы в области холодильной и криогенной техники и систем энергообеспечения с использованием современных вычислительных методов;
- применение программных средств компьютерной графики и визуализации результатов научно-исследовательской деятельности, оформление отчетов и презентаций, подготовки рефератов, докладов и статей с помощью современных офисных информационных технологий, средств печати;

– проектирование деталей и узлов с использованием программных средств компьютерного проектирования на основе эффективного сочетания передовых технологий и выполнения многовариантных расчетов;

– владение культурой профессиональной безопасности, способностью идентифицировать опасности и оценивать риски в сфере своей профессиональной деятельности;

– готовность применять профессиональные знания для минимизации негативных экологических последствий, обеспечения безопасности и улучшения условий труда в сфере своей профессиональной деятельности.

Дисциплина изучается студентами факультета заочного обучения на кафедре безопасности жизнедеятельности и промышленной теплотехники (БЖДипТ) самостоятельно по учебно-методической литературе [1,2,3,4] и закрепляется выполнением контрольных работ.

При изучении разделов дисциплины, выполнении контрольной работы в соответствии с настоящими методическими указаниями в случае отсутствия у студента-заочника необходимой литературы из рекомендуемого списка можно пользоваться аналогичной литературой других авторов.

Кроме того, студенты могут прослушать установочные и обзорные лекции по основным разделам дисциплины в период лабораторно-экзаменационной сессии в Университете ИТМО.

При возникновении вопросов в процессе изучения дисциплины студенты могут получить консультации в письменной или устной форме на кафедре БЖДипТ.

Изучение дисциплины рекомендуется осуществлять последовательно по темам, содержание и вопросы для самоподготовки по которым приведены в настоящих методических указаниях.

Переходить к изучению следующей темы рекомендуется только после полного усвоения предыдущей, составления ответов на вопросы и решения соответствующих задач.

В процессе изучения дисциплины студент-заочник должен выполнить две контрольные работы. Так, контрольная работа № 1 включает в себя решение и ответы на вопросы задач № 1, 2, 3; контрольная работа № 2 содержит решение и ответы на вопросы задач № 4, 5, 6 настоящих МУ.

Выполнив контрольную работу № 1, студенты проходят собеседование по данной работе и сдают зачет.

При собеседовании от студента требуется умение пояснить смысл и ход решения задач контрольной работы, умение сделать выводы и рекомендации из полученных результатов, оценивается качество выполнения работы (небрежное выполнение, низкое качество расчетов, грамматические ошибки в тексте).

Зачет проходит в форме устного собеседования (или в письменной форме) по темам, соответствующим задачам контрольной работы № 1. Предъявляемые требования включают в себя знание теории и понимание физико-химической сущности явлений и процессов, умение применять основные теоретические положения и расчетные зависимости в решении практических задач.

Выполнив контрольную работу № 2, студенты проходят собеседование по данной работе и получают допуск к экзамену по дисциплине. Экзамен проходит в письменной форме, включает в себя ответы на теоретические вопросы.

# **ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ»**

## **Раздел 1. Теплогенерирующие установки**

*Тема 1.1.* Принципы энергоснабжения объектов и систем их жизнеобеспечения. Основные потребители энергии, применяемые энергоносители и системы для их получения. Принципиальная схема и элементы систем тепло-, холодо- и электроснабжения. Основные принципы и способы получения теплоты, холода и электрической энергии.

*Тема 1.2.* Принципиальная технологическая схема и основные элементы теплогенерирующей установки. Принципиальная схема паровой (водогрейной) котельной, работающей на твердом топливе. Котельный агрегат, водоподготовка, тягодутьевые устройства.

*Тема 1.3.* Основы теории горения и принципы организации сжигания топлива. Классификация и элементарный состав топлива и его основных характеристик. Условное топливо. Стадии горения топлива. Состав и количество продуктов сгорания топлива.

*Тема 1.4.* Тепловой баланс теплогенератора. Располагаемая теплота и потери теплоты в теплогенераторе. Уравнение теплового баланса и к.п.д. теплогенератора. Расход топлива и мероприятия по его снижению. Условия качественного сжигания топлива.

*Тема 1.5.* Теплогенераторы объектов и систем их жизнеобеспечения. Паровые и водогрейные котлы, генераторы горячего воздуха, дымовых газов и газоздушных смесей. Основные рабочие процессы и характеристики.

## **Раздел 2. Теплоэнергетические (тепловые) установки**

*Тема 2.1.* Тепловые двигатели. Принципиальная схема и принцип работы одноступенчатой паровой турбины; графики изменения скорости и давления в турбине; ступени скорости и ступени давления; многоступенчатые турбины; работа пара в турбине, расход пара на турбину.

Поршневые двигатели внутреннего сгорания, индикаторные диаграммы, тепловой баланс, к.п.д., расход топлива. Способы повы-

шения эффективности и коэффициента использования теплоты топлива.

*Тема 2.2.* Паросиловые, газотурбинные и когенерационные (комбинированные) установки. Принципиальная тепловая схема и термодинамический цикл паротурбинной установки, к.п.д. цикла и мероприятия по его повышению. Расход топлива на конденсационной электростанции.

Принципиальная тепловая схема и термодинамический цикл газотурбинной установки (ГТУ), к.п.д. цикла и мероприятия по его повышению. Расход топлива на ГТУ.

Понятие о когенерационных (комбинированных) теплоэнергетических установках.

Принципиальная тепловая схема и термодинамический цикл теплофикационной паротурбинной установки.

Принципиальная тепловая схема и термодинамический цикл теплофикационной газотурбинной установки.

Принципиальная тепловая схема когенерационной установки с поршневым двигателем внутреннего сгорания. Оценка энергетической эффективности когенерационных теплоэнергетических установок. Эксергетический к.п.д.

### **Раздел 3. Системы теплоснабжения**

*Тема 3.1.* Классификация систем теплоснабжения. Водяные и паровые системы теплоснабжения, принципиальная схема и основное оборудование, «открытые» и «закрытые» водяные системы теплоснабжения.

Паровые системы теплоснабжения с возвратом конденсата и без возврата конденсата, принципиальная схема и основное оборудование. Регулирование отпуска теплоты.

*Тема 3.2.* Тепловые пункты систем теплоснабжения. Назначение теплового пункта. Классификация тепловых пунктов. Схемы присоединения тепловых потребителей к тепловым сетям.

Тепловые пункты водяных систем теплоснабжения. Принципиальная тепловая схема и основное оборудование.

Тепловые пункты паровых систем теплоснабжения. Принципиальная схема и основное оборудование.

## Раздел 4. Экологические проблемы энергетики

*Тема 4.1.* Энергетика и окружающая среда. Негативные аспекты воздействия энергетики на окружающую среду. Химическое и тепловое загрязнение окружающей среды. Транспорт энергии. Особенности режимов получения энергии в энергетических установках и ее потребления. Энергетический менеджмент и энергетический аудит. Методы снижения негативных экологических воздействий энергетических систем. Использование местных видов топлива, тепловых насосов.

*Тема 4.2.* Мероприятия по снижению негативных экологических воздействий энергетических систем на окружающую среду.

Особенности режимов потребления энергии и методов их выравнивания. Энергетический менеджмент. Энергетические установки для покрытия пиков потребления. Графики нагрузок и аккумулярование энергии. Аккумуляторы электрической, электромагнитной и тепловой энергии. Возобновляемые и невозобновляемые источники энергии. Прямое преобразование теплоты в электрическую энергию посредством использования термоэлектрогенераторов, термоэмиссионных преобразователей, магнетогидродинамических генераторов.

*Тема 4.3.* Энерготехнология и рекуперация побочных энергоресурсов (ПЭР). Понятие об энерготехнологии и побочных энергоресурсах. Классификация побочных энергоресурсов. Методы их рекуперации. Оценка технико-экономической эффективности рекуперации ПЭР. Применение мини-ТЭЦ. Экологические эффекты энергосбережения.

# ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

## Раздел 1. Теплогенерирующие установки

1. Основные потребители теплоты объектов жизнеобеспечения.
2. Сезонные и круглогодичные потребители теплоты.
3. Энергоносители систем энергоснабжения объектов жизнеобеспечения.
4. Теплоэнергетические установки для получения энергоносителей систем энергоснабжения.
5. Принципиальная схема и основные элементы систем энергоснабжения.
6. Принципиальная схема и основные элементы систем теплоснабжения.
7. Основные принципы и способы получения теплоты и электрической энергии.
8. Принципиальная схема и основные элементы паровой котельной, работающей на твердом топливе.
9. Принципиальная схема и принцип работы котельного агрегата.
10. Основные показатели качества питательной и сетевой воды. Назначение водоподготовки.
11. Осветление воды.
12. Искусственная тяга. Подбор дутьевых вентиляторов и дымососов.
13. Понятие о топливе. Классификация топлива.
14. Элементарный состав топлива и его основные характеристики. Условное топливо.
15. Теоретически необходимое количество воздуха. Коэффициент избытка (расхода) воздуха.
16. Состав и количество продуктов сгорания топлива.
17. Стадии горения топлива.
18. Расчет энтальпий воздуха и дымовых газов.
19. Понятие о теоретической температуре горения.
20. Способы сжигания топлива. Виды топок.

21. Понятие о тепловых напряжениях (плотностях теплового потока) зеркала горения и топочного объема. Определение основных размеров топки.

22. Потери теплоты в теплогенераторе.

23. Тепловой баланс и к.п.д. теплогенератора. Расход топлива.

24. Расход топлива в теплогенераторе и мероприятия по его снижению.

25. Условия качественного сжигания газообразного топлива.

26. Условия качественного сжигания жидкого топлива.

27. Условия качественного сжигания твердого топлива.

28. Понятие о генераторах теплоты в форме пара, горячей воды, горячего воздуха, дымовых газов и газозводушных смесей объектов жизнеобеспечения. Основные рабочие процессы и характеристики.

29. Принципы теплового расчета генераторов теплоты.

30. Принципы аэродинамического расчета генераторов теплоты, включая самотягу.

31. Естественная тяга. Подбор дымовой трубы.

32. Умягчение питательной и сетевой воды.

33. Деаэрация воды. Расход пара на деаэратор.

## **Раздел 2. Теплоэнергетические установки**

34. Принципиальная схема и принцип работы одноступенчатой паровой турбины. Графики изменения скорости и давления пара.

35. Ступени скорости и ступени давления многоступенчатой паровой турбины.

36. Работа пара в турбине. Изображение процесса в  $h-S$ -диаграмме. Расход пара на турбину.

37. Четырехтактный карбюраторный двигатель. Принцип работы. Индикаторная диаграмма. Показатели эффективности.

38. Четырехтактный дизель. Принцип работы. Индикаторная диаграмма. Показатели эффективности.

39. Тепловой баланс поршневого двигателя внутреннего сгорания. Показатели и методы повышения эффективности.

40. Принципиальная тепловая схема и термодинамический цикл конденсационной паротурбинной установки. К.п.д. цикла и мероприятия по его повышению.

41. Принципиальная тепловая схема и термодинамический цикл газотурбинной установки (ГТУ). К.п.д. цикла и мероприятия по его повышению. Расход топлива на ГТУ.

42. Понятие о когенерационных и тригенерационных (комбинированных) теплоэнергетических установках. Показатели эффективности. Эксергетический к.п.д.

43. Принципиальная тепловая схема, термодинамический цикл и показатели эффективности теплофикационной паротурбинной установки.

44. Принципиальная тепловая схема, термодинамический цикл и показатели эффективности теплофикационной газотурбинной установки.

45. Принципиальная схема и показатели эффективности когенерационной установки с поршневым двигателем внутреннего сгорания.

### **Раздел 3. Системы теплоснабжения**

46. Классификация и выбор систем теплоснабжения.

47. «Открытые» водяные системы теплоснабжения. Принципиальная схема и основное оборудование.

48. «Закрытые» водяные системы теплоснабжения. Принципиальная схема и основное оборудование.

49. Паровые системы теплоснабжения с возвратом конденсата. Принципиальная схема и основное оборудование.

50. Расчет и подбор пароводяных подогревателей подготовки воды для систем горячего водоснабжения.

51. Расчет и подбор пароводяных подогревателей подготовки воды для систем водяного отопления.

52. Подбор баков-аккумуляторов горячей воды.

53. Расчет и подбор теплопроводов систем теплоснабжения.

### **Раздел 4. Экологические проблемы энергетики**

54. Основные направления развития энергетики России.

55. Проблемы химического загрязнения окружающей среды от энергетических установок. Методы его снижения ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{HCl}$ ).

56. Проблемы теплового загрязнения окружающей среды от энергетических установок и методы его снижения.

57. Проблемы загрязнения окружающей среды от энергетических установок и методы его снижения.

58. Негативное экологическое воздействие транспорта энергии.

59. Особенности режимов получения энергии и ее потребления.

60. Задачи энергетического менеджмента и энергетического аудита.

61. Методы снижения негативных экологических воздействий энергетических систем.

62. Методы, системы и устройства выравнивания режимов потребления энергии.

63. Энергетические установки для покрытия пиков потребления энергии.

64. Аккумуляторы электрической и тепловой энергии (химические, индукционные, без изменения и с изменением агрегатного состояния энергоносителя и т. д.).

65. Местные виды топлива, возобновляемые источники энергии. Эффективность и особенность их применения.

66. Водород как источник энергии. Особенности его применения.

67. Прямое преобразование теплоты в электрическую энергию посредством использования термоэлектродвигателей и МГД-генераторов.

68. Понятие об энерготехнологии. Оценка эффективности использования сырья и энергии.

69. Понятие и классификация побочных энергетических ресурсов.

70. Методы рекуперации ПЭР.

71. Применение мини-ТЭЦ.

72. Оценка энергетической эффективности рекуперации ПЭР.

73. Экологические эффекты энергосбережения.

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ**

К выполнению контрольной работы следует приступать только после внимательного изучения соответствующего раздела курса. Кроме того, рекомендуется предварительно ознакомиться с ходом решения аналогичных задач по учебной литературе [5].

Контрольные задачи составлены по 100-вариантной (численной) системе, в которой исходные данные к каждой задаче выбираются из соответствующих таблиц (1, 2, 3, 4, 5, 6) по последней и предпоследней цифрам шифра (личного номера) студента-заочника. Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

При выполнении контрольной работы необходимо соблюдать следующие условия:

1) номера варианта (от 0 до 99) выбирать по двум последним цифрам шифра зачетной книжки;

2) полностью выписать условия задач и исходные данные;

3) решение задач сопровождать коротким пояснительным текстом, в котором указывать наименование определяемых величин, приводить формулы, числовые значения и вычисления в единицах СИ; решение иллюстрировать схемами и графиками;

4) в тексте работы приводить ссылки на литературу, а в конце контрольной работы дать список использованной литературы;

5) в работе, направляемой на повторную проверку после исправлений, должны быть сохранены замечания рецензента;

6) работа должна быть подписана студентом;

7) следует иметь в виду, что прием контрольных работ на рецензии прекращается за 10 дней до начала лабораторно-экзаменационной сессии;

8) заданием на контрольные работы служат нижеприведенные условия задач 1, 2, 3, 4, 5, 6.

## Задача 1

Заданы вид топлива, паропроизводительность котельного агрегата  $D$ , давление пара в котле  $p_{\text{п}}$ , температуры перегретого пара  $t_{\text{пе}}$ , питательной воды  $t_{\text{пв}}$  и уходящих дымовых газов  $t_{\text{ух}}$ , величина продувки  $\beta_{\text{пр}}$  и присосы холодного воздуха по газовому тракту котельного агрегата  $\Delta\alpha$ . Определить:

– состав рабочего топлива и его удельную низшую теплоту сгорания  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ ;

– способ сжигания топлива, тип топки, значение коэффициента избытка (расхода) воздуха в топке  $\alpha_1$  и за котельным агрегатом  $\alpha_{\text{ух}}$  (с учетом присоса холодного воздуха по газовому тракту  $\Delta\alpha$ );

– теоретическую температуру горения при  $\alpha_1$ ;

– потери теплоты с уходящими газами  $q_2$ ;

– коэффициент полезного действия котельного агрегата брутто  $\eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}$ ;

– расход натурального и условного топлива для получения пара;

– испарительность натурального и условного топлива;

– объем топки и площадь зеркала горения решетки (при сжигании твердого топлива) топочного устройства;

– объем продуктов сгорания, в том числе диоксидов углерода, серы, азота, водяных паров и золы (при сжигании твердого топлива).

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 1.

### Указания:

1. Состав и удельная низшая теплота сгорания топлива, а также рекомендации по выбору типа топки и значения коэффициента избытка воздуха приведены в справочных таблицах 1–7 приложения.

2. При определении теоретической температуры горения температуру воздуха перед топкой принимать при сжигании газа и мазута равной 25–30 °С, при сжигании твердого топлива – в соответствии с расчетными характеристиками топок, приведенными в табл. 4 прил.

3. Определение теоретической температуры горения производить при помощи  $H-t$ -диаграммы, для построения которой предварительно вычислить энтальпии продуктов сгорания при температурах 1500 и 2000 °С.

Теоретически необходимое количество воздуха (при нормальных условиях) для полного сгорания единицы количества топлива:

– для твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V^0 = 0,0889C^p + 0,265H^p + 0,033(S_{\text{л}}^p - O^p),$$

где  $C^p$ ,  $H^p$ ,  $S_{\text{л}}^p$ ,  $O^p$  – массовые содержания горючих компонентов и кислорода в рабочей массе топлива, %;

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum (m + \frac{n}{4}) C_m H_n - O_2],$$

где CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, O<sub>2</sub> – содержание горючих компонентов и кислорода в газообразном топливе, %.

Объем трехатомных газов:

– для твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = 1,866 \frac{C^p + 0,375S_{\text{л}}^p}{100};$$

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n).$$

Теоретический объем азота:

– для твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,008N^p;$$

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{N_2}^0 = 0,79V^0 + 0,01N_2.$$

Теоретический объем водяных паров:

– для твердого и жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_{H_2O}^0 = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,0161V^0;$$

– для газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(\sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S + H_2 + 0,124d_{\text{г}} + 1,61V^0),$$

где  $d_{\text{г}} = (5 \div 10)$  г/м<sup>3</sup> – влагосодержание газообразного топлива.

Теоретический объем дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{\Gamma}^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 .$$

Действительный объем дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)V^0 .$$

Энтальпия теоретического объема воздуха, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_{\text{в}}^0 = V^0 \cdot C_{\text{вз}} \cdot t .$$

Энтальпия теоретического объема дымовых газов, кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_{\Gamma}^0 = (V_{RO_2} \cdot C_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot C_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot C_{H_2O})t .$$

Энтальпия действительного объема дымовых газов при  $\alpha > 1$ , кДж/кг, кДж/м<sup>3</sup>:

$$H_{\Gamma} = H_{\Gamma}^0 + (\alpha - 1)H_{\text{в}}^0 ,$$

где  $C_{\text{вз}}$ ,  $C_{CO_2}$ ,  $C_{N_2}$ ,  $C_{H_2O}$ , кДж/(м<sup>2</sup>·К) – средние удельные, объемные при постоянном давлении теплоемкости воздуха, трехатомных газов, азота и водяных паров (см. прил. табл. 7).

4. Величину потерь теплоты с уходящими газами  $q_2$ , %, определять по формуле

$$q_2 = (H_{\text{yx}} - \alpha_{\text{yx}} \cdot H_{\text{xb}}^0) \cdot (100 - q_4) / Q_{\text{н}}^{\text{p}} ,$$

где  $H_{\text{yx}}$  – энтальпия уходящих газов при  $\alpha_{\text{yx}}$  и  $t_{\text{yx}}$ , кДж /кг;  $H_{\text{xb}}^0$  – энтальпия теоретического количества воздуха, поступившего в котельный агрегат при температуре 30 °С;  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  – удельная низшая теплота сгорания рабочей массы топлива, кДж /кг;  $q_4$  – потери теплоты от механического недожога, %.

5. Величину потерь теплоты от химического  $q_3$ , механического недожога  $q_4$  и от наружного охлаждения  $q_5$  принять согласно справочным таблицам 4, 5, 6 приложения.

6. Коэффициент полезного действия котельного агрегата брутто, %:

$$\eta_{\text{кз}}^{\text{бр}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) .$$

7. Расход топлива для получения пара, кг/с, м<sup>3</sup>/с:

$$B = \frac{D \cdot [h_{\text{п}} - h_{\text{пв}} + \frac{\beta_{\text{пр}}}{100} (h_{\text{кв}} - h_{\text{пв}})] \cdot 100}{Q_{\text{н}}^{\text{р}} \cdot \eta_{\text{ка}}^{\text{бр}}},$$

где  $h_{\text{п}}$ ,  $h_{\text{пв}}$ ,  $h_{\text{кв}}$ , кДж/кг – удельные энтальпии пара, питательной и котловой (кипящей) воды;  $\beta_{\text{пр}}$ , % – величина продувки.

8. Испарительность топлива, кг/кг, кг/м<sup>3</sup>:

$$И = \frac{D}{B}.$$

9. Объем топки  $V_{\text{T}}$ , площадь зеркала горения  $R_{\text{зг}}$  (для слоевых топок) топки определять с помощью известных расходов топлива  $B$ , кг/с, и тепловых напряжений (плотностей теплового потока) топочного объема  $q_{\text{V}} = B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} / V_{\text{T}}$ , кВт/м<sup>3</sup>, и зеркала горения  $q_{\text{R}} = B \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}} / R_{\text{зг}}$ , кВт/м<sup>2</sup>.

10. Расходы составляющих продуктов сгорания  $\dot{V}_{\text{гi}}$ , м<sup>3</sup>/с и  $\dot{G}_{\text{з}}$ , м/с могут определяться по формулам

$$\dot{V}_{\text{гi}} = V_{\text{гi}} \cdot B;$$

$$\dot{G}_{\text{з}} = 0,01 \cdot A^{\text{р}} B,$$

где  $V_{\text{гi}}$  – объем составляющих дымовых газов, м<sup>3</sup>/кг;  $A^{\text{р}}$  – содержание золы в топливе, %.

### Ответить на вопросы:

1. Как зависит теоретическая температура горения от коэффициента избытка воздуха и температуры воздуха перед топкой?

2. Как зависит потеря теплоты с уходящими газами от температуры уходящих газов и коэффициента избытка воздуха?

Кроме того, изобразить схему котельной установки и дать ее краткое описание.

Таблица 1

## Исходные данные для решения задачи 1

Последняя цифра шифра	Вид топлива	Пред- последняя цифра шифра	$D$ , т/ч	$\beta_{пр}$ , %	$\Delta\alpha$	$P_{п}$ , МПа	$t_{пс}$ , °С	$t_{пв}$ , °С	$t_{уэ}$ , °С
0	Газ. Газопровод Ставрополь–Грозный	4	4	3	0,27	1,4	240	100	135
1	Уголь. Воркутинский Ж	5	6,5	3,5	0,25	2,4	300	104	130
2	Уголь. Черемховский Д	3	1	4,5	0,32	0,17	Нас.	50	155
3	Газ. Газопровод Брянск–Москва	0	10	2,5	0,26	2,4	370	102	120
4	Газ биологический жи- вотноводческих ферм	6	20	2	0,22	2,4	240	102	140
5	Уголь. Назаровский Б	1	20	2	0,22	1,4	250	100	135
6	Газ. Газопровод Брянск–Москва	2	10	2,5	0,26	2,4	370	102	120
7	Уголь. Кизеловский Г	9	6,5	3	0,24	1,4	250	100	145
8	Мазут малосернистый	8	4	4	0,25	1,4	Нас.	102	150
9	Уголь. Подмосковный Б	7	1	5	0,3	0,9	Нас.	50	170

## Задача 2

Паровые турбины: конденсационная с регулируемым производственным отбором пара или противодавленческая работают без регенерации теплоты. Параметры пара перед стопорным или регулирующим клапаном: давление  $p_0$  и температура  $t_0$ . За клапаном давление понижается до  $0,95 p_0$ . Давление пара за турбиной в конденсаторе  $p_k$  или противодавление  $p_{пр}$ . Давление пара в отборе  $p_{отб}$ . Давление пара перед регулирующим клапаном отбора  $p_{об} = 1,04 p_{отб}$ .

Определить параметры пара (энтальпии и степень сухости): в турбине, располагаемые и внутренние теплоперепады в турбине или в ее отсеках, внутреннюю  $N_i$ , эффективную  $N_e$  и электрическую  $N_z$  мощности при относительном внутреннем к.п.д.  $\eta_{oi}$ , механическом к.п.д.  $\eta_m$ , к.п.д. электрического генератора  $\eta_{эг}$  и расходах пара через турбину  $G$  и  $G_{отб}$ . Определить также для конденсационной турбины расход охлаждающей воды и кратность охлаждения в конденсаторе, если температура охлаждающей воды на входе в конденсатор  $+ 12$  °С, а на выходе – на  $3$  °С ниже температуры насыщенного пара при давлении  $p_k$ , количество теплоты, отданное потребителю  $Q_T$  и относительную выработку электрической энергии на тепловом потреблении  $\mathcal{E}_o$ , энергетическую эффективность комбинированного получения теплоты и электрической энергии.

Расчет произвести при помощи  $h$ – $S$ -диаграммы, изобразить рабочие процессы в диаграмме и показать схему расчета.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 2. При этом расход отборного пара  $D_{отб}$  принимается для турбин с отбором пара при заданном давлении пара в отборе  $p_{отб}$ , для турбин без отбора пара  $D_{отб}$  принимать равным нулю.

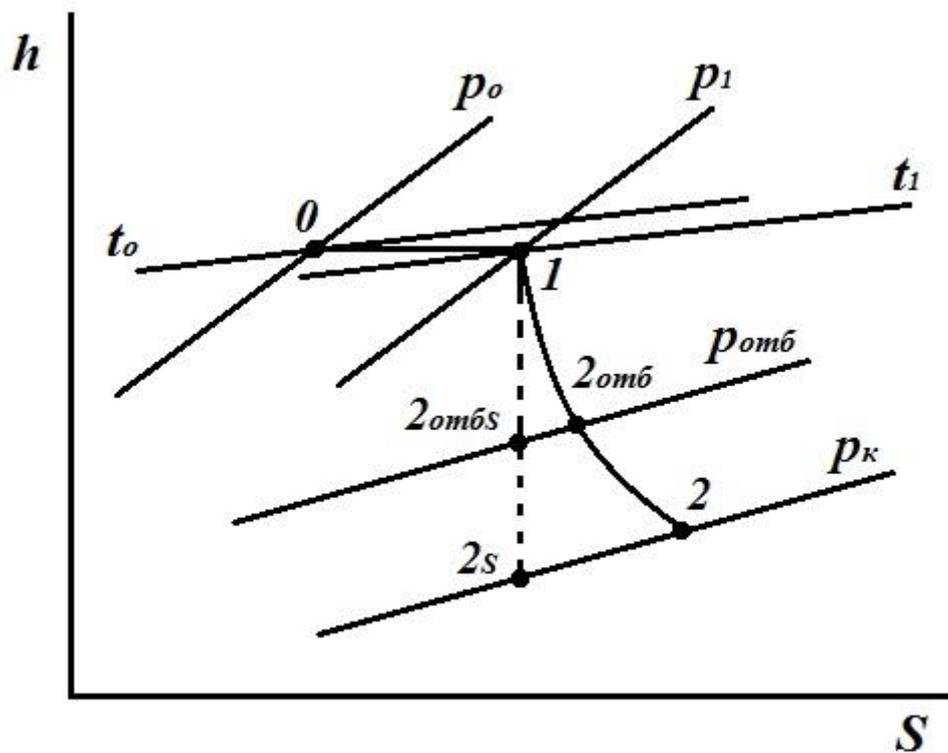
### Указания:

1. Параметры пара в турбине определяются при построении процесса для турбины в  $h$ – $S$ -диаграмме (см. с. 22). Здесь  $p_0$  – давление пара перед клапаном  $P'_0 = 0,95 \cdot P_0$ ; 0–1 – процесс дросселирования пара в клапане; 1–2<sub>S</sub> – теоретический процесс преобразования энергии пара в турбине; 1–2 – действительный внутренний процесс; 1–2<sub>отбS</sub> – теоретический процесс преобразования энергии отборного пара в турбине; 1–2<sub>отб</sub> – действительный внутренний процесс.

Таблица 2

Исходные данные для решения задачи 2

Последняя цифра шифра	$P_0$ , МПа	$t_0$ , °С	$P_k$ , МПа	$P_{отб}$ , МПа	$P_{пр}$ , МПа	Пред-последняя цифра шифра	$G$ , т/ч	$G_{отб}$ , т/ч	$\eta_{oi}$	$\eta_M$	$\eta_{ЭГ}$
0	3,43	435	–	–	0,4	0	33	18	0,8	0,97	0,96
1	2,4	370	0,0049	0,49	–	1	9,8	7	0,72	0,93	0,94
2	1,47	350	–	–	0,4	2	30	15	0,68	0,98	0,95
3	3,43	435	0,0049	0,5	–	3	10	8	0,74	0,94	0,98
4	2,4	370	0,0049	0,4	–	4	12	8	0,72	0,95	0,96
5	1,47	350	–	–	0,7	5	34	20	0,76	0,96	0,97
6	3,43	435	0,0049	0,12	–	6	9,8	7	0,66	0,92	0,93
7	1,47	350	–	–	0,3	7	22	10	0,7	0,98	0,97
8	2,4	370	–	–	0,5	8	30	12	0,75	0,96	0,95
9	1,47	350	–	–	0,6	9	35	20	0,78	0,99	0,97



$h$ - $S$ -диаграмма

Удельная теоретическая работа пара в турбине, кДж/кг:

$$W_{птS} = h_1 - h_{2s},$$

отборного пара, кДж/кг:

$$W_{отбS} = h_1 - h_{отбS}.$$

Внутренняя мощность турбины с отбором пара, кВт:

$$N_i = G_{отб} \cdot W_{отбS} \cdot \eta_{0i} + (G - G_{отб}) \cdot W_{птS} \cdot \eta_{0i}.$$

без отбора пара:  $N_i = G \cdot W_{птS} \cdot \eta_{0i}$ .

Эффективная мощность турбины, кВт:

$$N_e = N_i \cdot \eta_M.$$

Электрическая мощность, развиваемая на зажимах электрического генератора, кВт:

$$N_э = N_e \cdot \eta_{эГ}.$$

2. Для конденсационной паровой турбины определяются: расход охлаждающей воды на конденсатор, кг/с:

$$M_{\text{ов}} = \frac{G_{\text{к}} \cdot (h_2 - c_{\text{к}} \cdot t_{\text{к}})}{c_{\text{ов}} \cdot (t''_{\text{ов}} - t'_{\text{ов}})}$$

и величина кратности охлаждения

$$m = \frac{M_{\text{ов}}}{G_{\text{к}}},$$

где  $G_{\text{к}} = G - G_{\text{отб}}$  – расход пара на входе в конденсатор, кг/с;  $h_2 = h_1 - w_{\text{птс}} \cdot \eta_{0i}$  – энтальпия пара на входе в конденсатор, кДж/кг;  $t_{\text{к}}$  – температура конденсата, °С, принимается равной температуре насыщенного пара, соответствующей его давлению на входе в конденсатор  $p_{\text{к}}$ ;  $c_{\text{к}}$ ,  $c_{\text{ов}}$  – соответственно удельная теплоемкость конденсата и охлаждающей воды, кДж/(кг·К);  $t'_{\text{ов}}$ ,  $t''_{\text{ов}}$  – температура охлаждающей воды соответственно при входе и выходе из конденсатора, °С.

3. Для противодавленческой паровой турбины определяется расход теплоты (мощность), отпускаемой потребителю, кВт:

$$Q_{\text{т}} = G \cdot (h_2 - h_{\text{кт}}),$$

где  $h_2 = h_1 - (w_{\text{с}} \cdot \eta_{0i})$  – энтальпия пара, отпускаемого потребителю, кДж/кг;  $h_{\text{кт}}$  – энтальпия конденсата, кДж/кг (принимается при температуре 70 °С); относительное комбинированное получение электрической энергии на внешнем тепловом потреблении  $\mathcal{E}_0 = \frac{N_{\text{э}}}{Q_{\text{т}}}$ .

Аналогично определяется для конденсационной паровой турбины с отбором пара расход теплоты, отпускаемой потребителю, кВт:

$$Q_{\text{т}} = G_{\text{отб}} \cdot (h_{2\text{отб}} - h_{\text{кт}}),$$

где  $h_{2\text{отб}} = h_1 - (w_{\text{отбс}} \cdot \eta_{0i})$  – энтальпия пара, отпускаемого потребителю, кДж/кг.

4. Энергетическая эффективность комбинированного получения отпускаемых теплоты и электрической энергии определяется (годовой) экономией топлива  $\Delta B$  по сравнению с замещаемым отдельным способом получения отпускаемых видов энергетической продукции: теплоты  $Q_T$  в котельной, электрической энергии  $N_э$  на тепловых конденсационных электростанциях (КЭС), кг/с:

$$\Delta B = B_{\text{КЭС}} + B_{\text{КУ}} - B_{\text{ТЭЦ}},$$

где  $B_{\text{КЭС}} = N_э / (Q_n^p \cdot \eta_{\text{КЭС}})$  – расход топлива на замещаемой КЭС, кг/с;  $Q_n^p$  – удельная низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг, принимается равной удельной теплоте сгорания условного топлива  $Q_{\text{ут}} = 29350$  кДж/кг;  $\eta_{\text{КЭС}}$  – к.п.д. КЭС, принимается для сравнительных расчетов равным 0,37;  $B_{\text{КУ}} = Q_T / (Q_n^p \cdot \eta_{\text{КУ}})$  – расход топлива в замещаемой котельной, кг/с;  $\eta_{\text{КУ}}$  – к.п.д. замещаемой котельной, принимается равным ранее рассчитанному в задаче 1 к.п.д. котельного агрегата брутто;  $B_{\text{ТЭЦ}} = (N_i + Q_T) / (Q_n^p \cdot \eta_{\text{КУ}})$  – расход топлива при комбинированном получении теплоты и электрической энергии.

5. Изобразить схему и термодинамический цикл паротурбинной установки и привести их краткое описание.

### Задача 3

Четырехтактный поршневой двигатель внутреннего сгорания является приводом компрессора холодильной машины, работающей в режиме теплового насоса с коэффициентом трансформации  $\mu$ . Определить составляющие уравнения теплового баланса двигателя: теплоту, преобразованную в полезную работу, потери теплоты с охлаждающей водой, с отработанными газами. Остаточные потери, а также теплопроизводительность теплового насоса, возможную суммарную теплопроизводительность и коэффициент использования теплоты комплекса тепловой двигатель – тепловой насос, если при испытании измерена эффективная мощность двигателя  $N_e$  (кВт); за время  $\tau$  (с) двигатель израсходовал  $G$  (кг) топлива с низшей теплотой сгорания  $Q_H^P = 42,5$  мДж/кг, расход охлаждающей воды через двигатель  $G_B$  (кг/с), повышение ее температуры в двигателе  $\Delta t_B$  (°С), объем газов, получаемый при сгорании 1 кг топлива  $V_T = 16,5$  м<sup>3</sup>/кг (0 °С, 0,1МПа), объем воздуха, необходимый для сгорания 1 кг топлива  $V_{B3} = 15,6$  м<sup>3</sup>/кг, температура уходящих газов  $t_T$  (°С) и средняя объемная теплоемкость газов  $c_{pg} = 1,45$  кДж/(м<sup>3</sup>·°С), температура воздуха  $t_{B3} = 20$  °С.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 3.

#### Указания:

1. Расход топлива двигателем, кг/с:

$$B = G/\tau .$$

2. Теплота, преобразованная в эффективную работу, кВт:

$$Q_e = N_e;$$

$$q_e = [Q_e/(B \cdot Q_H^P)] \cdot 100, \% .$$

3. Потери теплоты с охлаждающей водой, кВт:

$$Q_{охл} = G_B \cdot c_B \cdot \Delta t_B;$$

$$q_{охл} = [Q_{охл}/(B \cdot Q_H^P)] \cdot 100, \% .$$

Таблица 3

## Исходные данные для решения задачи 3

Последняя цифра шифра	$N_e$ , кВт	$\tau$ , мин	$G$ , кг/с	Предпоследняя цифра шифра	$G_B$ , кг/с	$\Delta t_B$ , °C	$t_r$ , °C	$\mu$
0	50	40	10	0	1,3	10	500	2
1	45	44	10	1	1,1	12	450	3
2	42	48	10	2	1,0	13	550	3,2
3	52	18	5	3	0,9	15	460	2,75
4	55	8	5	4	0,9	14	480	3,4
5	60	30	10	5	1,0	11	490	3,6
6	58	17	5	6	1,4	10	520	3,3
7	48	19	5	7	1,2	12	540	3,1
8	45	21	5	8	1,1	13	560	4,6
9	56	36	10	9	1,0	14	600	4,3

4. Потери теплоты с отработавшими газами, кВт:

$$Q_{yг} = B \cdot (V_{г} \cdot c_{рг} \cdot t_{г} - V_{вз} \cdot c_{рв} \cdot t_{в});$$

$$q_{yг} = [Q_{yг} / (B \cdot Q_{н}^p)] \cdot 100, \%$$

5. Потери теплоты от химической неполноты сгорания и остаточные, кВт:

$$Q_{хн} + Q_{ост} = B \cdot Q_{н}^p - (Q_e + Q_{охл} + Q_{yг}),$$

$$q_{хн} + q_{ост} = [(Q_{хн} + Q_{ост}) / (B \cdot Q_{н}^p)] \cdot 100, \%$$

6. Теплопроизводительность теплового насоса, кВт:

$$Q_{тн} = N_e \cdot \mu$$

7. Теплопроизводительность рекуператора теплоты  $Q_{рг}$ , кВт, отработавших газов при температуре газов на выходе из рекуператора  $t_{г}'' = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $c_{рг}'' = 1,35 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C})$ :

$$Q_{рг} = B \cdot (V_{г} \cdot c'_{рг} \cdot t'_{г} - V_{г} \cdot c''_{рг} \cdot t''_{г})$$

8. Возможная теплопроизводительность установки с учетом рекуперации теплоты, кВт:

$$Q_{те} = Q_{охл} + Q_{рг} + Q_{тн}$$

9. Коэффициент использования теплоты топлива

$$\eta_{и} = Q_{те} / (B \cdot Q_{н}^p)$$

10. Изобразить индикаторные диаграммы четырехтактных поршневых карбюраторных и дизельных двигателей и привести их краткое описание.

## Задача 4

Определить суммарный расчетный расход теплоты на технологические нужды, отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение промышленного предприятия производительностью по отпускаемой продукции  $\Pi_i$ , т/ч, если удельный расход теплоты на ее получение  $q_i$ , ГДж/т, объем отапливаемых зданий по наружному обмеру  $V_n$ , м<sup>3</sup>, объем вентилируемых зданий  $\mu$ , % от объема отапливаемых, удельная отопительная характеристика здания  $q_o$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°С), удельная вентиляционная характеристика здания  $q_b$ , Вт/(м<sup>3</sup>·°С), расход горячей воды на технологические и хозяйственно-бытовые нужды  $G_b$ , кг/с, средняя температура горячей воды  $t_{гв}$ , °С, температура холодной воды  $t_{хв}$ , °С, коэффициент полезного использования теплоты в водоподогревателях  $\eta_b$ , средняя температура воздуха внутри отапливаемого помещения  $t_{вн}$ , °С, расчетная температура наружного воздуха  $t_n$ , °С.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 4.

### Указания:

1. Расчетный расход теплоты на технологические нужды, Вт:

$$Q_{тн}^p = 278 \cdot 10^3 \cdot q_i \cdot \Pi_i$$

2. Расчетный расход теплоты на отопление, Вт:

$$Q_{от}^p = q_o \cdot V_n \cdot (t_{вн} - t_n)$$

3. Расчетный расход теплоты на вентиляцию, Вт:

$$Q_b^p = q_b \cdot V_n \cdot \mu \cdot 0,01(t_{вн} - t_n)$$

4. Средний расход теплоты на горячее водоснабжение, Вт:

$$Q_{гв}^{cp} = G_b \cdot c_b \cdot (t_{гв} - t_{хв})$$

5. Расчетный расход теплоты на горячее водоснабжение, Вт:

$$Q_{гв}^p = 2 \cdot Q_{гв}^{cp}$$

6. Изобразить схемы водяной и паровой систем теплоснабжения основных потребителей теплоты. Привести краткое описание схем.

Таблица 4

Исходные данные для решения задачи 4

Последняя цифра шифра	Вид продукции	$q_i$ , ГДж/т	$\Pi_i$ , т/ч	$V_n$ , м <sup>3</sup>	$\mu$ , %	$q_o$ , Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	$q_e$ , Вт/(м <sup>3</sup> ·°С)	Предпоследняя цифра шифра	$G_B$ , кг/с	$t_{гв}$ , °С	$t_{хв}$ , °С	$\eta_B$	$t_{вн}$ , °С	$t_{н}$ , °С
0	Мясопродукты	1,35	8,4	$50 \cdot 10^3$	60	0,25	0,32	0	7	55	5	0,97	18	-30
1	Хлебопродукты	0,17	3	$16 \cdot 10^3$	70	0,39	0,82	1	4	60	6	0,96	19	-25
2	Молочные продукты	1,4	7	$55 \cdot 10^3$	64	0,28	0,34	2	6	65	7	0,95	20	-20
3	Мармелад	0,83	2	$10 \cdot 10^3$	58	0,46	0,92	3	3	54	8	0,96	18	-15
4	Мясопродукты	1,2	6	$40 \cdot 10^3$	65	0,22	0,31	4	8	64	5	0,97	19	-27
5	Хлебопродукты	0,15	4	$20 \cdot 10^3$	55	0,38	0,8	5	3,5	57	6	0,95	20	-35
6	Молочные продукты	1,2	4,5	$45 \cdot 10^3$	68	0,29	0,35	6	5	61	7	0,96	18	-26
7	Мясопродукты	1,3	5	$35 \cdot 10^3$	70	0,24	0,33	7	5,5	56	5	0,97	19	-32
8	Халва	0,6	1,5	$10 \cdot 10^3$	72	0,44	0,88	8	2	53	6	0,96	20	-18
9	Молочные продукты	1,5	6,8	$60 \cdot 10^3$	56	0,29	0,325	9	4,5	58	7	0,95	18	-31

## Задача 5

Для условий задачи 4 определить диаметры паропровода на технологические нужды, конденсатопровода и трубопровода для горячей воды, если давление насыщенного пара, отпускаемого источником теплоты, равно  $P_{\text{п}}$ , МПа, температура пара –  $t_{\text{п}}$ , °С, доля возврата конденсата составляет  $k$ , температура конденсата  $t_{\text{к}}$ , °С, температура горячей воды  $t_{\text{гв}}$ , °С.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл. 5.

### Указания:

1. Расчетный массовый расход пара на технологические нужды, кг/с:

$$D_{\text{тн}} = Q_{\text{тн}}^{\text{п}} / (h_{\text{п}} - k \cdot h_{\text{к}}).$$

2. Расчетный массовый расход конденсата, кг/с:

$$D_{\text{к}} = k \cdot D_{\text{тн}}.$$

3. Внутренний диаметр трубопровода, м:

$$d_i = \sqrt{\frac{\dot{V}_i \cdot 4}{w_i \cdot \pi}},$$

где  $\dot{V}_i$  – объемный расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/с;  $\dot{V}_i = v_i \cdot M_i$ ;  $v_i$  – удельный объем теплоносителя, м<sup>3</sup>/кг;  $M_i (D_{\text{тн}}, D_{\text{к}}, G_{\text{в}})$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $w_i$  – рекомендуемая скорость теплоносителя, м/с (для пара  $w_{\text{п}} = 20 \div 30$  м/с, конденсата  $w_{\text{к}} = 1,5 \div 2$  м/с, горячей воды  $w_{\text{гв}} = 1 \div 1,5$  м/с).

4. Изобразить схему водяной и паровой систем теплоснабжения и привести их краткое описание.

Таблица 5

Исходные данные для решения задачи 5

Последняя цифра шифра	$P_n$ , МПа	$t_n$ , °С	Предпоследняя цифра шифра	$k$	$t_k$ , °С
0	0,8	Насыщение	0	0,5	65
1	0,47	Насыщение	1	0,6	60
2	2,4	240	2	0,4	70
3	0,8	Насыщение	3	0,45	60
4	1,4	230	4	0,55	65
5	0,8	Насыщение	5	0,4	70
6	2,4	Насыщение	6	0,5	75
7	0,8	Насыщение	7	0,6	60
8	1,4	Насыщение	8	0,55	65
9	2,4	250	9	0,45	70

## Задача 6

Газотурбинная установка, включающая в себя компрессор, камеру сгорания, газовую турбину, газоздушный тракт, систему управления и вспомогательные устройства, служит для привода электрического генератора мощностью  $N_э$ . Для повышения тепловой экономичности установки в газоздушный тракт после газовой турбины включают котел-утилизатор для получения теплоты  $Q_{те}$  в виде пара или горячей воды за счет дальнейшего охлаждения дымовых газов.

Воздушный компрессор (К) забирает воздух при температуре  $t'_{вк}$ , сжимает его, степень повышения давления  $\varepsilon$ , и при повышенном давлении  $P'_k$  подает его в камеру сгорания (КС), в которую подается органическое топливо с теплотой сгорания  $Q_H^p$ . За счет подведенной теплоты сгорания топлива образуются высокотемпературные дымовые газы повышенного давления, которые при температуре  $t'_{гт}$  поступают в газовую турбину и, расширяясь до конечного давления, производят работу, используемую для привода компрессора и электрического генератора мощностью  $N_э$ .

Определить температуру воздуха на выходе из компрессора  $t''_{вк}$  ( $T''_k$ ), коэффициент избытка воздуха в камере сгорания  $\alpha$ , степень понижения давления в турбине  $\varepsilon_t$ , температуру газов на выходе из турбины  $t''_{гт}$  ( $T''_{гт}$ ), удельную внутреннюю работу расширения газа в турбине  $W_{гт}$ , удельную внутреннюю работу, затраченную на сжатие воздуха  $W_k$ , удельный расход топлива  $b$ , удельную эффективную работу газотурбинной установки  $W_e$ , расход дымовых газов через турбину  $\dot{G}_г$ , расход воздуха, подаваемого компрессором  $\dot{G}'_к$ , расход топлива  $B$ , мощность газовой турбины  $N_{гт}$ , мощность, потребляемую компрессором  $N_k$ , электрический к.п.д. установки  $\eta_э$ , возможную тепловую мощность котла-утилизатора  $\dot{Q}_{ут}$ , коэффициент использования теплоты комбинированной теплофикационной установки  $\eta_{и}$  при коэффициенте потерь давления  $\zeta$ , к.п.д. камеры сгорания  $\eta_{кс}$ , механическом к.п.д. турбины  $\eta_m$ , к.п.д. электрического генератора  $\eta_{эг}$ , изоэнтропийных к.п.д. турбины  $\eta_t$ , компрессора  $\eta_k$ , коэффициенте утечек  $\alpha_y$  и температуре дымовых газов на выходе из котла-утилизатора  $t''_{ку}$ .

Исходные данные для решения задачи выбрать из табл. 6.

Таблица 6

## Исходные данные для решения задачи 6

Последняя цифра шифра	$N_3$ , МВт	$t'_{ГТ}$ , °С	$t'_{ВК}$ , °С	$\varepsilon$	$\lambda$	Пред-последняя цифра шифра	$\eta_{КС}$	$\eta_{К}$	$\eta_{Т}$	$\eta_{М}$	$\eta_{ЭГ}$	$\alpha_{У}$	$t''_{ВК}$ , °С
0	0,6	820	5	5,5	0,97	0	0,97	0,8	0,82	0,9	0,93	0,006	150
1	1	1000	10	6,2	0,975	1	0,98	0,85	0,88	0,93	0,95	0,006	160
2	2,5	1000	15	12	0,98	2	0,985	0,87	0,89	0,94	0,94	0,006	170
3	3	1070	20	13	0,99	3	0,99	0,87	0,89	0,94	0,94	0,006	150
4	6,3	920	8	12	0,98	4	0,99	0,86	0,88	0,94	0,95	0,0055	160
5	8	1050	6	16	0,99	5	0,975	0,87	0,99	0,94	0,94	0,0055	160
6	10	1100	7	16	0,99	6	0,97	0,86	0,88	0,95	0,95	0,005	150
7	15	870	12	12	0,98	7	0,99	0,87	0,99	0,95	0,95	0,005	160
8	32	925	14	13,2	0,985	8	0,98	0,87	0,89	0,95	0,95	0,005	150
9	45	950	16	13,5	0,99	9	0,99	0,87	0,89	0,94	0,96	0,005	140

### Указания:

Уравнение теплового баланса ГТУ

$$\dot{G}_{\text{КС}} \cdot h''_{\text{ГКС}} = \dot{G}_{\text{К}} \cdot h'_{\text{К}} + B \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{КС}} + B \cdot h_{\text{ТЛ}},$$

где  $\dot{G}_{\text{КС}}$  – расход газов на выходе из камеры сгорания, кДж/с;  $h''_{\text{ГКС}}$  – энтальпия дымовых газов на выходе из камеры сгорания, кДж/кг;  $\dot{G}_{\text{К}}$  – расход воздуха на входе в КС, кг/с;  $h'_{\text{К}}$  – энтальпия воздуха на входе в КС, кДж/кг;  $B$  – расход топлива, подаваемого в КС, кг/с;  $Q_{\text{Н}}^{\text{P}}$  – удельная низшая теплота сгорания топлива, подаваемого в КС, кДж/кг;  $h_{\text{ТЛ}}$  – энтальпия топлива, кДж/кг;  $\eta_{\text{КС}}$  – КПД камеры сгорания.

$$\dot{G}_{\text{К}} = \alpha \cdot L_{\text{O}} \cdot B, \text{ кг/с};$$

$$\dot{G}_{\text{КС}} = (1 + \alpha \cdot L_{\text{O}}) \cdot B, \text{ кг/с},$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха в КС;  $L_{\text{O}}$  – теоретически необходимое количество воздуха, кг/кг.

При расчете тепловых схем ГТУ, работающих на газе различных месторождений и легких жидких топливах, ввиду малого различия величины  $L_{\text{O}}$  принято использовать условное топливо “стандартный углеводород” следующего массового состава: углерод С = 85 % и водород Н = 15 %, у которого  $Q_{\text{Н}}^{\text{P}} = 44300$  кДж/кг,  $L_{\text{O}} = 15$  кг/кг. В табл. 8 представлены значения энтальпий дымовых газов (при  $\alpha = 1$ ) и воздуха при различных температурах [4].

Дымовые газы, выходящие из КС, можно рассматривать как смесь теоретического количества дымовых газов  $(1+L_{\text{O}})$  и избыточного воздуха  $(\alpha - 1)L_{\text{O}}$ .

Тогда энтальпия смеси дымовых газов при температуре  $t_{\text{c}}$  может быть рассчитана по зависимости

$$h_{\text{Гс}} = \frac{1 + L_{\text{O}}}{1 + \alpha L_{\text{O}}} h_{\text{Г}}^{\text{O}} + \frac{(\alpha - 1)L_{\text{O}}}{1 + \alpha L_{\text{O}}} h_{\text{В}},$$

где  $h_{\text{Г}}^{\text{O}}$ ,  $h_{\text{В}}$  – энтальпии теоретических дымовых газов ( $\alpha = 1$ ) и воздуха при температуре  $t_{\text{c}}$ , определяемые по прил. (табл. 8).

При заданных температуре газов на выходе из КС ( $t''_{КС}$ ) и температуре воздуха на входе в КС ( $t'_{КС}$ ) коэффициент избытка воздуха можно определить по зависимости

$$\alpha = \frac{Q_H^p \cdot \eta_{КС} + L_o \cdot h_B + h_{ТЛ} - (1 + L_o)h_G^o}{L_o(h''_{ВКС} - h'_{ВКС})},$$

где  $h'_{ВКС}$ ,  $h''_{ВКС}$  – энтальпии воздуха на входе и выходе из КС, кДЖ/кг.

Методика расчета тепловой схемы ГТУ при заданных следующих исходных данных:

электрическая мощность  $N_э$ , кВт; температура газов перед турбиной  $t''_{КС} = t'_{ГТ}$ , °С; температура воздуха на входе в компрессор  $t'_{ВКС}$ , °С; отношение давлений (степень повышения давления) в компрессоре  $\varepsilon = P''_К/P'_К$ ; коэффициент потерь давления  $\lambda = \delta/\varepsilon$ ; к.п.д. камеры сгорания  $\eta_{КС}$ , механический к.п.д. турбины  $\eta_M$ , к.п.д. электрического генератора  $\eta_{ЭГ}$ , изоэнтروпийный к.п.д. турбины  $\eta_{ГТ}$ , изоэнтропийный к.п.д. компрессора  $\eta_K$ , коэффициент утечек  $\alpha_y$ .

1. Параметры процесса повышения давления воздуха в компрессоре.

В первом приближении показатель степени принимают как

$$m_B = R_B/C_{pB} = 0,28.$$

Определяют температуру воздуха в конце процесса повышения давления воздуха в компрессоре, К:

$$T''_К = T'_К \left(1 + \frac{\varepsilon^{m_B} - 1}{\eta_K}\right),$$

по которой в табл. 8 находят энтальпии, кДЖ/(кг·К):

$$h''_{ВКС} = h^*_К(t''_{ВКС}) - h^*_К(25),$$

где  $h^*$  – значение энтальпии из табл. 8;

по  $t'_{ВКС}$  – энтальпию воздуха на входе в компрессор:

$$h'_{ВКС} = h^{*'}_К(t'_{ВКС}) - h'_{К}(25).$$

Вычисляют среднюю теплоемкость воздуха в процессе повышения давления, кДж/(кг·К):

$$C_{\text{PВК}} = \frac{h''_{\text{К}} - h'_{\text{К}}}{t''_{\text{К}} - t'_{\text{К}}}.$$

Уточняют значение  $m_{\text{В}}$ :

$$m_{\text{В}} = \frac{R_{\text{В}}}{C_{\text{PК}}} = \frac{0,287}{C_{\text{PК}}}$$

и температуру воздуха за компрессором, К:

$$T''_{\text{ВК}} = T'_{\text{ВК}} \left( 1 + \frac{\varepsilon^{m_{\text{В}}} - 1}{\eta_{\text{К}}} \right)$$

и по табл. 8 уточняют значение энтальпии, кДж/(кг·К):

$$h''_{\text{ВК}} = h''^*(t''_{\text{ВК}}) - h'_{\text{К}}(25).$$

2. Определяют коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Предварительно находят энтальпию воздуха на выходе из КС, кДж/кг:

$$h''_{\text{ВКС}} = h''^*(t''_{\text{КС}}) - h'_{\text{ВКС}}(25)$$

и ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

$$h''_{\text{ГКС}} = h''^*(t''_{\text{КС}}) - h^{\circ}_{\text{ГКС}}(25)$$

и, предполагая  $h_{\text{ТЛ}} = 0$ ,

$$\alpha = \frac{Q_{\text{Н}}^{\text{P}} \cdot \eta_{\text{КС}} + L_{\text{O}} \cdot h_{\text{ВК}}'' + h_{\text{ТЛ}} - (1 + L_{\text{O}})h_{\text{ГКС}}^{\circ}}{L_{\text{O}}(h_{\text{ВКС}}'' - h'_{\text{ВКС}})}.$$

3. Энтальпия дымовых газов перед газовой турбиной, кДж/кг:

$$h''_{\text{ГКС}} = h'_{\text{ГТТ}};$$

$$h''_{\text{ГКС}} = \frac{1 + L_{\text{O}}}{1 + \alpha L_{\text{O}}} h_{\text{ГКС}}^{\circ} + \frac{(\alpha - 1)L_{\text{O}}}{1 + \alpha L_{\text{O}}} h_{\text{ВКС}}''.$$

4. Параметры процесса расширения (снижения давления) газа в турбине.

Степень понижения давления в турбине:

$$\varepsilon_T = \lambda \cdot \varepsilon.$$

Предварительно задав  $m_T = 0,25$ , определяют температуру газов на выходе из турбины, К:

$$T_{ГТ}'' = T_{ГТ}' [1 - (1 - \varepsilon_{ГТ}^{-m_T}) \eta_T]$$

и энтальпии, кДж/кг:

– дымовых газов ( $\alpha = 1$ )

$$h_{Г}^o(t_{ГТ}'') = h_{Г}^{o*}(t_{ГТ}'') - h_{В}^*(25),$$

– воздуха

$$h_{В}^o(t_{ГТ}'') = h_{В}^{**}(t_{ГТ}'') - h_{В}^*(25),$$

– газозоудной смеси перед ГТ

$$h_{ГТТ}'' = \frac{1 + L_o}{1 + \alpha L_o} h_{ГТТ}^{o''} + \frac{(\alpha - 1)L_o}{1 + \alpha L_o} h_{ВГТТ}''.$$

Средняя теплоемкость газов в процессе расширения, кДж/(кг·К):

$$C_{pГ} = \frac{h_{ГТТ}'' - h_{ГТТ}'}{t_{ГТТ}'' - t_{ГТТ}'}.$$

Объемная доля воздуха в дымовых газах:

$$r_{В} = \frac{q(\alpha - 1)}{1 + q(\alpha - 1)},$$

где

$$q = \frac{\mu_{п}^o}{\mu_{В}} \cdot \frac{L_o}{1 + L_o} = \frac{28,66}{28,97} \cdot \frac{15}{16} = 0,92747,$$

здесь  $\mu_{п}^o = 28,66$  кг/моль,  $\mu_{В} = 28,97$  кг/моль.

Молекулярная масса дымовых газов, кг/моль:

$$\mu_{\Gamma} = \mu_{\text{B}} \cdot r_{\text{B}} + \mu_{\text{П}}^{\circ}(1 - r_{\text{B}}) .$$

Газовая постоянная дымовых газов, кДж/(кг·К):

$$R_{\Gamma} = \frac{8,314}{\mu_{\Gamma}} .$$

Уточненное значение коэффициента  $m_{\Gamma}$ :

$$m_{\text{B}} = \frac{R_{\Gamma}}{C_{\text{P}\Gamma}} .$$

Уточненная температура газов за турбиной, К:

$$T_{\Gamma\Gamma}'' = T_{\Gamma\Gamma}' [1 - (1 - \varepsilon_{\Gamma\Gamma}^{-m_{\Gamma}})\eta_{\Gamma}]$$

и энтальпии, кДж/кг:

– газов ( $\alpha = 1$ )

$$h_{\Gamma\Gamma}^{\circ''} = h_{\Gamma\Gamma}^{\circ*} \cdot (t_{\Gamma\Gamma}'') - h_{\Gamma}^{\circ} \cdot (25) ,$$

– воздуха

$$h_{\text{B}\Gamma\Gamma}'' = h_{\text{B}\Gamma\Gamma}^* \cdot (t_{\Gamma\Gamma}'') - h_{\text{B}} \cdot (25) ,$$

– газовой смеси перед ГТ

$$h_{\Gamma\Gamma}'' = \frac{1 + L_o}{1 + \alpha L_o} h_{\Gamma\Gamma}^{\circ''} + \frac{(\alpha - 1)L_o}{1 + \alpha L_o} h_{\text{B}\Gamma\Gamma}'' .$$

5. Работа расширения 1 кг газа в турбине, кДж/кг:

$$W_{\Gamma\Gamma} = h_{\Gamma\Gamma}' - h_{\Gamma\Gamma}'' .$$

6. Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха в компрессоре, кДж/кг:

$$W_{\text{K}} = h_{\text{BK}}'' - h_{\text{BK}}' .$$

7. Эффективная работа ГТУ (на валу агрегата), кДж/кг:

$$W_e = W_{\text{ГТ}} \cdot \eta_{\text{М}} - b \cdot W_{\text{К}} ,$$

где

$$b = \frac{\alpha L_o (1 + \alpha_y)}{1 + \alpha L_o} .$$

8. Расход дымовых газов через турбину, кг/с:

$$\dot{G}_{\text{Г}} = \frac{N_{\text{Э}}}{W_e \cdot \eta_{\text{ЭГ}}} .$$

9. Расход воздуха, подаваемого компрессором, кг/с:

$$G'_{\text{К}} = \dot{G}_{\text{К}} (1 + \alpha_y) = b \cdot \dot{G}_{\text{Г}} .$$

10. Расход топлива, кг/с:

$$B = \frac{\dot{G}_{\text{Г}}}{1 + \alpha L_o} .$$

11. Мощность газовой турбины, кВт:

$$N_{\text{ГТ}} = \dot{G}_{\text{Г}} \cdot W_{\text{ГТ}} .$$

12. Мощность, потребляемая компрессором, кВт:

$$N_{\text{К}} = \dot{G}'_{\text{К}} \cdot W_{\text{К}} .$$

13. Коэффициент полезной работы:

$$\varphi = \frac{N_{\text{ГТ}} - N_{\text{К}}}{N_{\text{ТТ}}} .$$

14. Электрический к.п.д. ГТУ:

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{\dot{G}_{\text{Г}} \cdot W_e \cdot \eta_{\text{ЭГ}}}{B \cdot Q_{\text{Н}}^{\text{P}}} .$$

15. Возможная тепловая мощность утилизатора теплоты, установленного после ГТУ, кВт:

$$\dot{Q}_{\text{ут}} = \dot{G}_r [h''_{\text{ГТ}} - h''_{\text{ГУТ}}],$$

где  $h''_{\text{ГУТ}} = f(t''_{\text{КУ}})$  определяется аналогично  $h''_{\text{ГТ}}$  при  $t''_{\text{КУ}}$ .

16. Коэффициент использования теплоты комбинированной установки

$$\eta_{\text{и}} = \frac{\dot{Q}_{\text{ут}} + N_{\text{э}}}{B \cdot Q_{\text{H}}^{\text{P}}}.$$

17. Изобразить схему и термодинамический цикл газотурбинной установки и привести её краткое описание.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### Основной

1. Теплотехника: Учеб. для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. – 792 с.

2. **Кисс В.В., Казаков А.В., Рахманов Ю.А.** Расчет паровой системы теплоснабжения пищевого предприятия: Учеб.-метод. пособие для вузов. – СПб.: Изд-во НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 68 с.

### Дополнительный

3. **Панкратов Г.П.** Сборник задач по теплотехнике: Учеб. пособие для неэнергетических специальных вузов. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1986. – 286 с.

4. Турбины тепловых и атомных электрических станций: Учеб. для вузов. – 2-е изд, перераб. и доп. / Под ред. А. Г. Костюка, В. В. Фролова. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 488 с.

5. **Роддатис К.Ф., Полтарецкий А.Н.** Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддатиса. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.

### Ресурсы ИНТЕРНЕТ

1. Универсальная информационная система «Россия»

[www.cir.ru](http://www.cir.ru)

2. Научная электронная библиотека

[www.clibrary.ru](http://www.clibrary.ru)

3. Электронная библиотека образовательных и просветительских изданий

[www.iglib.ru](http://www.iglib.ru)

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица 1

#### Средний состав и теплота сгорания некоторых видов газообразного топлива

Газопровод	Состав газа, % по объему							Q <sub>Рн</sub> МДж/м <sup>3</sup>
	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
Брянск–Москва	92,8	3,9	1,1	0,4	0,1	1,6	0,1	37,31
Оренбург–Совхозное	91,4	4,1	1,9	0,6	–	0,2	0,7	38,02
Ставрополь–Грозный	98,2	0,4	0,1	0,1	0	1,0	0,2	35,63
Газ биологический животноводческих ферм	66,0	–	–	–	–	30,8	3,2	23,61

Таблица 2

#### Потеря теплоты от наружного охлаждения котельного агрегата в зависимости от паропроизводительности

Паропроизводительность, т/ч	1	2	4	6,5	10	20	35
Потери теплоты от наружного охлаждения, %	4	3,6	3	2,2	1,65	1,3	1,1

**Типы топок, рекомендуемые для котельных агрегатов**

Виды топлива	Паропроизводительность, т/ч	Рекомендуется
Твердое топливо	2,5	Топка с простой колосниковой решеткой (РПК)
Каменный бурый уголь (исключая бурый уголь повышенной влажности 35 %)	6,5–10	Полумеханические топки с забрасывателем и неподвижной решеткой (ПМЗ-РПК)
Бурые угли (включая угли повышенной влажности) и неспекающиеся каменные угли		Топка с шурующей планкой (ТШП)
Каменные и бурые угли	6,5–20	Механические топки с забрасывателем и цепной решеткой обратного хода (ПМЗ-ЛЦР, ПМЗ-ЧЦР)
	10–35	Механические топки с цепными чешуйчатыми решетками (ЧЦР)
Газ и мазут	При всех значениях	Камерная топка

Таблица 4

## Расчетные характеристики слоевых топок для сжигания твердого топлива

Наименование характеристик	Обозначение	Топки с РПК			Топки ПМЗ–РПК			Топки ТПШ		Топки ПМЗ–ЛЦР–ЧЦР		Топки ЧЦР		
		Бурые угли	Антрациты		Угли									
			Сортированные	Несортированные	Бурые	Каменные	Антрациты	Бурые	Каменные	Бурые типа подмосковного	Каменные	Каменные неспекающиеся	Слабоспекающиеся	Антрациты
Тепловое напряжение: зеркала горения, кВт/м <sup>2</sup>	$q_R$	800	1160	870	930– 1050	1050	930– 1050	800– 930	930– 1050	1150– 1280	1050– 1600	1160	1050	1160– 800
топочного объема, кВт/м <sup>3</sup>	$q_V$	290	290	290	230– 290	290	230– 290	230– 290	230– 290	230– 290	230– 290	230– 290	230– 290	230– 290
Значение коэффициента избытка воздуха	$\alpha$	1,45	1,4	1,45	1,4	1,4	1,6	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,6– 1,5
Потери теплоты: от химического недожога, %;	$q_3$	3	2	2	1	1	0,5	1	1	0,5	0,5	1	1	0,5
от механического недожога, %	$q_4$	9	7	12	10	7	12–18	7–9	7	9	6	6	5	7–14
Давление воздуха под решеткой, Па	$p$	800	1000	1000	600	600	600	1000	1000	800	800	800	800	1000
Температура дутье- вого воздуха, °С	$t$	25	25	25	25	25	25	25	25	150– 250	25– 200	25– 200	25– 200	25– 200

Таблица 5

**Расчетные характеристики некоторых видов твердого и жидкого топлива**

Район месторождения	Бассейн, месторождение	Марка	Элементарный состав рабочей массы, %							$Q_H^p$ , МДж/кг	$V_L^p$ , %
			$W^p$	$A^p$	$S_D^p$	$C^p$	$H^p$	$N^p$	$O^p$		
Тульская обл.	Подмосковный	Б2Р	32	25,20	1,2–1,5	28,7	2,2	0,6	8,6	9,88	48
Пермская обл. Урал	Кизеловское	Г	6	31,00	6,1	48,5	3,6	0,8	4,0	19,59	44
Красноярский край Канско-Ачинский	Назаровское	Б2	39	7,30	0,4	37,6	2,6	0,4	12,7	13,02	48
Иркутская обл.	Черемховское	Д	12	27,00	1,1	45,9	3,4	0,7	8,9	17,88	47
Республика Коми	Воркутинское	Ж	7	23,60	0,8	59,6	3,8	1,3	5,4	20,60	35,9
Мазут малосернистый		40	3	0,05	0,3	84,65	11,7	–	0,3	41,30	–

Таблица 6

## Расчетные характеристики камерных топок для сжигания природного газа и мазута

Вид топлива	Тип топки	Тип горелки	Значение коэффициентов избытка воздуха	Тепловое напряжение топочного объема $q_v$ , кВт/м <sup>3</sup>	Потери теплоты от химического недожога $q_3$ , %
Природный газ	Экранированная	Подовая	1,1–1,15	580	1
		Смесительная	1,1–1,15	350	1,5
		Эжекционная	1,1–1,15	350	1,5
	Неэкранированная	Подовая	1,25	460	1
		Смесительная	1,2	290	1,5
		Эжекционная	1,2	290	1,5
Мазут	Экранированная	–	1,1	290–460	2
	Неэкранированная	–	1,2	230–290	1

Таблица 7

## Средняя теплоемкость воздуха и газов

t, °C	C <sub>CO2</sub>	C <sub>N2</sub>	C <sub>O2</sub>	кДж/(м <sup>3</sup> ·К)			t, °C	C <sub>CO2</sub>	C <sub>N2</sub>	C <sub>O2</sub>	кДж/(м <sup>3</sup> ·К)			C <sub>CB</sub>	C <sub>B</sub>
				C <sub>H2O</sub>	C <sub>CB</sub>	C <sub>B</sub>					C <sub>H2O</sub>	C <sub>CB</sub>	C <sub>B</sub>		
0	1,6010	1,2955	1,3069	1,4954	1,2981	1,3198	1200	2,2655	1,4154	1,5017	1,7782	1,4338	1,4623		
100	1,7016	1,2968	1,3186	1,5063	1,3014	1,3253	1300	2,2915	1,4263	1,5117	1,8042	1,4443	1,4736		
200	1,7887	1,3006	1,3362	1,5235	1,3081	1,3328	1400	2,3154	1,4359	1,5214	1,8293	1,4539	1,4841		
300	1,8641	1,3077	1,3571	1,5436	1,3182	1,3433	1500	2,3372	1,4451	1,5306	1,8541	1,4631	1,4937		
400	1,9312	1,3173	1,3785	1,5666	1,3299	1,3555	1600	2,3573	1,4539	1,5390	1,8775	1,4719	1,5029		
500	1,9902	1,3286	1,3990	1,5909	1,3437	1,3693	1700	2,3761	1,4623	1,5474	1,9010	1,4799	1,5113		
600	2,0426	1,3412	1,4179	1,6161	1,3576	1,3840	1800	2,3933	1,4698	1,5553	1,9228	1,4879	1,5189		
700	2,0900	1,3546	1,4355	1,6425	1,3718	1,3986	1900	2,4092	1,4770	1,5629	1,9437	1,4950	1,5268		
800	2,1327	1,3680	1,4510	1,6693	1,3852	1,4124	2000	2,4239	1,4837	1,5704	1,9643	1,5021	1,5340		
900	2,1708	1,3806	1,4657	1,6969	1,3986	1,4259	2100	2,4377	1,4904	1,5771	1,9840	1,5084	1,5411		
1000	2,2052	1,3928	1,4786	1,7242	1,4108	1,4384	2200	2,4503	1,4962	1,5842	2,0024	1,5147	1,5474		
1100	2,2366	1,4045	1,4904	1,7514	1,4225	1,4594	2300	2,4620	1,5021	1,5909	2,0204	1,5205	1,5536		

Примечание: приведены значения теплоемкости для диапазона температур от 0 до 2300 °C.

Таблица 8

**Удельная изобарическая теплоемкость и энтальпия сухого воздуха  
и продуктов сгорания углеводородного топлива  
(85 % углерода и 15 % водорода)**

$t$ , °С	$T$ , К	$c_p$ , кДж/ (кг · К)	$c_p$ , кДж/ (кг · К)	$h$ , Дж/кг	$t$ , °С	$T$ , К	$c_p$ , кДж/ (кг · К)	$c_p$ , кДж/ (кг · К)	$h$ , кДж/кг
Сухой воздух: $R = 0,28699$ кДж/(кг · К) $\mu = 28,97$ кг/кмоль					Продукты сгорания: $\alpha = 1$ ; $R = 0,2901$ кДж/(кг · К) $\mu = 28,66$ кг/кмоль				
0	273	1,0028	1,0028	0	0	273	1,0660	1,0660	0
25	298	1,0038	1,0032	25,08	25	298	1,0718	1,0689	26,77
50	323	1,0053	1,0038	50,19	50	323	1,0776	1,0718	53,59
100	373	1,0098	1,0056	100,56	100	373	1,0900	1,0778	107,78
150	423	1,0163	1,0080	151,21	150	423	1,1031	1,0840	162,60
200	473	1,0244	1,0111	202,22	200	473	1,1172	1,0905	218,10
250	523	1,0339	1,0147	253,67	250	523	1,1320	1,0973	274,33
300	573	1,0445	1,0187	305,61	300	573	1,1475	1,1044	331,31
350	623	1,0559	1,0232	358,13	350	623	1,1634	1,1117	389,08
400	673	1,0677	1,0281	411,22	400	673	1,1795	1,1191	447,65
450	723	1,0798	1,0331	464,91	450	723	1,1956	1,1267	507,03
500	773	1,0918	1,0384	519,20	500	773	1,2116	1,1344	567,20
550	823	1,1036	1,0438	574,09	550	823	1,2272	1,1422	628,19
600	873	1,1150	1,0493	629,58	600	873	1,2423	1,1499	689,93
650	923	1,1258	1,0547	685,58	650	923	1,2568	1,1576	752,41
700	973	1,1361	1,0602	742,13	700	973	1,2707	1,1651	815,60
750	1023	1,1457	1,0656	799,17	750	1023	1,2839	1,1726	879,47
800	1073	1,1546	1,0709	856,68	800	1073	1,2964	1,1800	943,98
850	1123	1,1629	1,0760	914,62	850	1123	1,3083	1,1872	1009,10
900	1173	1,1707	1,0811	972,97	900	1173	1,3195	1,1942	1074,80
950	1223	1,1779	1,0860	1031,68	950	1223	1,3302	1,2011	1141,04
1000	1273	1,1846	1,0907	1090,75	1000	1273	1,3403	1,2078	1207,81
1050	1323	1,1909	1,0954	1150,14	1050	1323	1,3499	1,2143	1275,02
1100	1373	1,1969	1,0998	1209,83	1100	1373	1,3590	1,2207	1342,79
1150	1423	1,2025	1,1042	1269,82	1150	1423	1,3676	1,2269	1410,96
1200	1473	1,2079	1,1084	1330,08	1200	1473	1,3758	1,2330	1479,55
1250	1523	1,2130	1,1125	1390,60	1250	1523	1,3835	1,2388	1548,53
1300	1573	1,2178	1,1165	1451,36	1300	1573	1,3908	1,2444	1617,91
1350	1623	1,2223	1,1204	1512,36	1350	1623	1,3976	1,2498	1687,69
1400	1673	1,2265	1,1242	1573,60	1400	1673	1,4040	1,2550	1767,87

## Соотношения между некоторыми единицами физических величин

$$1 \text{ кг} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{с}^2/\text{м};$$

$$1 \text{ Н} = 0,102 \text{ кгс}; 1 \text{ кгс} = 9,81 \text{ Н};$$

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н}/\text{м}^2 = 10^{-5} \text{ бар} = 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ атм} = 0,102 \text{ мм рт.ст.};$$

$$1 \text{ Дж} = 2,78 \cdot 10^7 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ ккал};$$

$$1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж};$$

$$1 \text{ Вт} = 0,102 \text{ кгс} \cdot \text{м}/\text{с} = 1,36 \cdot 10^{-3} \text{ л.с.} = 0,86 \text{ ккал}/\text{ч};$$

$$1 \text{ ккал}/\text{ч} = 1,163 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 860 \text{ ккал};$$

$$1 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) = 0,239 \cdot 10^{-3} \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) = 0,86 \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{К}).$$

## СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	3
ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ДИСЦИПЛИНЫ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ» .....	7
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ.....	10
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	14
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	42

Рахманов Юрий Алексеевич

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

**Учебно-методическое пособие**

Ответственный редактор  
Т.Г. Смирнова

*Редактор*  
Р.А. Сафарова

*Компьютерная верстка*  
Н.В. Гуральник

*Дизайн обложки*  
Н.А. Потехина

---

Подписано в печать 15.12.2016. Формат 60×84 1/16  
Усл. печ. л. 3,02. Печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,06  
Тираж 50 экз. Заказ № С 57

---

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс  
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9