

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА
ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
НА ТЭЦ, КЭС И В РАЙОННЫХ КОТЕЛЬНЫХ**

Методические указания

*к выполнению практических занятий и курсового проекта (работ)
для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»,
21.03.01 «Нефтегазовое дело», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
всех форм обучения*

Воронеж 2021

УДК 621.1
ББК 31.361

Составители:

Д. Н. Китаев, Г. Н. Мартыненко

Термодинамические основы производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, КЭС и в районных котельных: метод. указания к выполнению практических занятий и курсового проекта (работ) для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство», 21.03.01 «Нефтегазовое дело», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Д.Н. Китаев, Г.Н. Мартыненко. – Воронеж, 2021. – 40 с.

Представлены основы методики термодинамического и технико-экономического расчета производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, КЭС и в районных котельных. Приведен пример расчета в необходимом для выполнения курсовой работы объеме, а также справочные данные.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 08.03.01 «Строительство», 21.03.01 «Нефтегазовое дело», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» всех форм обучения.

Ил. 13. Табл. 3. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 621.1
ББК 31.361**

Рецензент - *Т. В. Щукина, канд. техн. наук, доцент кафедры жилищно-коммунального хозяйства Воронежского государственного технического университета*

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

Процессы водяного пара, паросилового цикл Ренкина, термодинамические основы производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, КЭС и в районных котельных изучаются студентами бакалавриата направления подготовки 08.03.01 «Строительство», 21.03.01 «Нефтегазовое дело», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» всех форм обучения в курсе «Техническая термодинамика».

В соответствии с учебным планом студенты бакалавриата направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» выполняют курсовой проект, направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» - курсовую работу. У бакалавриата направления 08.03.01 «Строительство» предусмотрены практические занятия по данной тематике.

Приступая к выполнению курсовой работы, студент должен изучить вопросы, связанные с водяным паром, должен уметь определять его параметры по i - S - диаграмме, а также с помощью таблиц и аналитически. Является необходимым умение строить процессы изменения состояния водяного пара.

В представленных методических указаниях приведены краткие сведения по основному оборудованию ТЭЦ, рассмотрена схема паротурбинной ТЭЦ с регулируемым отбором. Описан порядок построения процессов изменения состояния водяного пара в контурах ТЭЦ в i - S и T - S - диаграммах. Представлена упрощенная методика расчета термодинамических и технико-экономических параметров производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ, КЭС и в районных котельных.

В публикациях отечественных ученых многие десятилетия ведется дискуссия о выборе показателей эффективности и методов расчета совместного производства тепловой и электрической энергии. Существует несколько десятков методик расчета, предложенных учеными и инженерами различных организаций в различное время. В нашей стране долгое время предпочтение отдавалось физическому методу, который дает возможность простейшим способом распределять затраты топлива между различными видами производимой энергии. Основы этого метода и представлены в данных методических указаниях. В настоящее время этот метод используют лишь для приближенной оценки. Предлагаемые эксергетический и нормативный методы тоже имеют ряд недостатков и признаются несостоятельными. Создаются новые методики, но общего положительного мнения по поводу их использования среди ученых в настоящее время нет.

В методических указаниях представлен пример выполнения курсовой работы. Справочные данные, представленные в приложениях, помогут при расчете параметров пара. Методические указания составлены так, что студентам не придется в процессе выполнения курсового проекта(работы) и выполнения практических обращаться к другим источникам.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Промышленные и коммунально-бытовые предприятия, сельское хозяйство, транспорт, население страны используют в основном энергию двух видов: электрическую и тепловую. Выработка этих видов энергии может производиться отдельно, в двух технологических процессах – по одному для каждого вида энергии, или совместно – в одном технологическом процессе.

В первом случае на электрической станции производится один вид продукции – электрическая энергия, которая централизованно распределяется между потребителями. Такие электростанции в настоящее время оборудованы преимущественно паровыми турбинами, имеющими конденсаторы, и называются они *конденсационными электрическими станциями (КЭС)*. Для снабжения предприятий и удовлетворения коммунально-бытовых нужд населения другим видом энергии – тепловой – строят отдельные котельные, которые отпускают тепло централизованно или индивидуально (котельная в жилом доме).

Выработка обоих видов энергии – электрической и тепловой – не отдельно, а в едином технологическом процессе дает большие экономические преимущества и осуществляется на *теплоэлектроцентралях (ТЭЦ)* [1].

Установленные на них турбины называются конденсационными турбинами с регулируемым отбором пара. Продольный разрез такой турбины приведен на рис. 1.1.

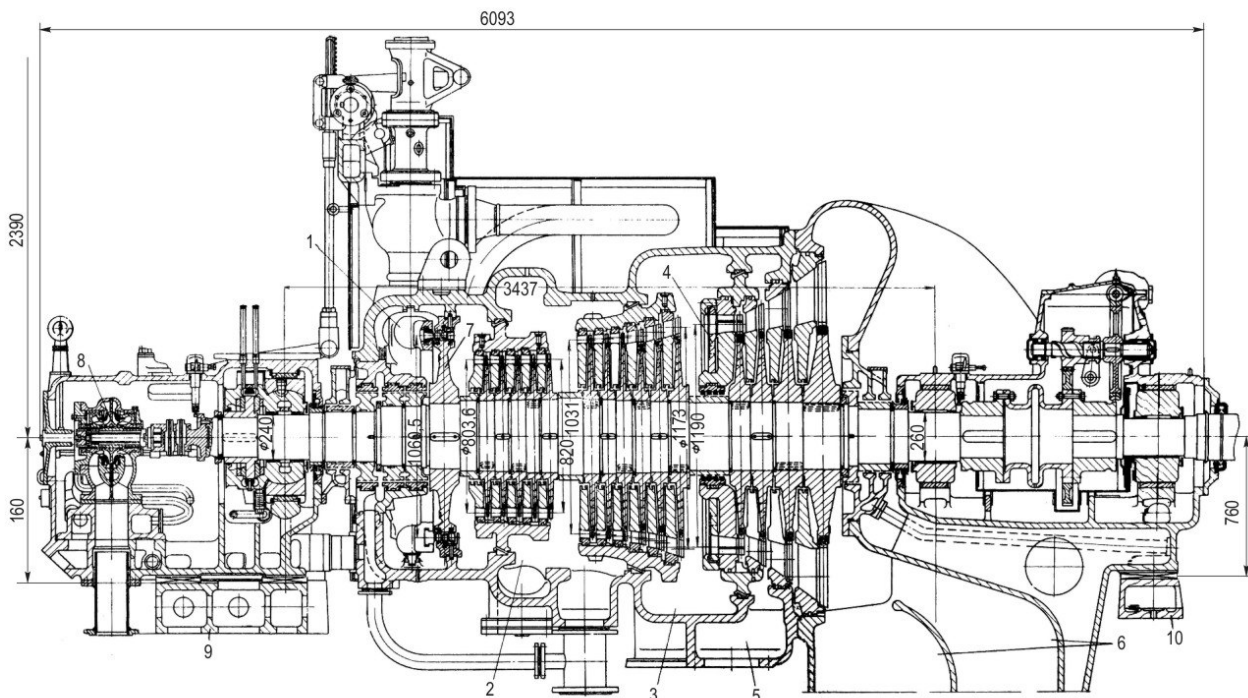


Рис. 1.1. Продольный разрез паровой турбины Т-12-35 УТМЗ:

1 – паровпускная камера; 2 – камера первого отбора; 3 – камера регулируемого отбора; 4 – поворотная диафрагма; 5 – камера третьего отбора; 6 – выпускной патрубок; 7 – двухвечная ступень; 8 – насосная группа; 9 – фундаментная рама; 10 – фундаментная рама для выхлопной части турбины

В качестве примера на рис. 1.1 показан продольный разрез турбины типа-размера Т-12-35. Это конденсационная турбина мощностью 12000 кВт со следующими начальными параметрами пара: давление $P=3,43$ МПа (35 кгс/см^2), температура $t = 435^\circ\text{C}$, с теплофикационным (иначе – отопительным) регулируемым отбором. Турбина одноцилиндровая, состоящая из двух частей: *части высокого давления* (ЧВД), в которой имеются одна двухвенечная ступень и одиннадцать активных ступеней давления, после которых расположен регулируемый отбор, и *части низкого давления* (ЧНД), имеющей четыре активные ступени давления. Турбина имеет и два нерегулируемых отбора для подогрева питательной воды. Давление в регулируемом отборе можно менять в диапазоне 0,7–2,5 МПа, поддерживая нужную температуру пара, отпускаемого для подогрева сетевой воды, поступающей в отопительную сеть. Температуру сетевой воды регулируют в зависимости от температуры наружного воздуха.

2. КОМБИНИРОВАННАЯ ВЫРАБОТКА ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЭЦ

2.1. Характеристика основного оборудования ТЭЦ

Основным оборудованием любой тепловой электростанции являются паровая турбина и конденсатор (парогенератор тоже относится к основному оборудованию, но в данных методических указаниях не рассматривается).

Простейшая схема преобразования энергии в тепловом двигателе турбинного типа дана на рис. 2.1 [3].

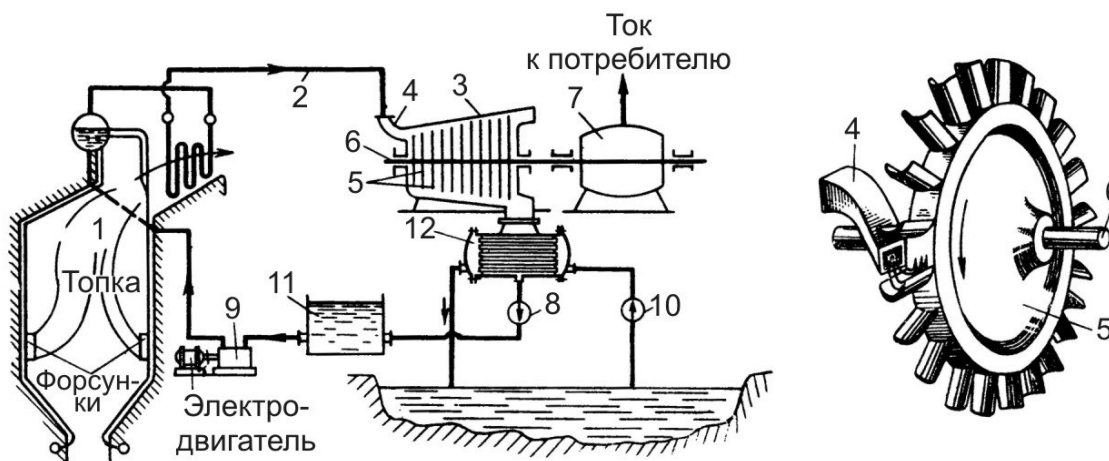


Рис. 2.1. Преобразование энергии в тепловом двигателе турбинного типа:
 1 – парогенератор; 2 – паропровод; 3 – паровая турбина; 4 – насадка (сопло);
 5 – диски с насаженными на них лопатками; 6 – вал турбины;
 7 – электрический генератор; 8, 9, 10 – насосы; 11 – питательный бак; 12 – конденсатор

Как видно из рис. 2.1, пар из сопла 4 поступает на лопатки турбины 3, посаженные на диск 5. Этот диск плотно, с натягом, посажен на вал 6. В канале между лопатками пар совершает криволинейное движение, в результате которого возникает центробежная сила, приложенная к лопаткам, приводя их вместе с валом в движение. Таким образом, большая часть кинетической энергии пара превращается в механическую энергию вращения вала турбины. Сопла могут располагаться по всей окружности (или занимать часть ее), они размещены в диафрагме и образуют сопловой аппарат, а диск с лопатками составляют рабочее колесо. Диафрагма с соплами и рабочее колесо образуют рабочую ступень турбины. Как показано на рис. 1.1, паровая турбина ТЭЦ имеет не одну, а несколько ступеней. В одной ступени сложно выработать всю потенциальную энергию пара (перепад давлений) и получить большую мощность при сравнительно небольшой скорости вращения. Поэтому, для уменьшения скорости вращения вала турбину разделяют на ступени, в каждой из которых происходит частичное падение давления. Скорость после каждой ступени остается одной и той же; развиваемая же каждой ступенью мощность передается на вал турбины и на нем суммируется. Обычно скорость вращения вала многоступенчатых турбин на ТЭЦ составляет $n = 3000$ об/мин, что позволяет получить на применяемых электрогенераторах частоту тока 50 Гц.

По мере последовательного прохождения пара через ступени турбины его давление падает, объем увеличивается, и соответственно должны увеличиваться сечения для прохода пара; растут диаметры колес и длины лопаток (до определенного предела, вызванного механическим напряжением).

Расчет термодинамических процессов турбины ведется с помощью i - S диаграммы. Расширение в каждой ступени без учета внутреннего трения происходит адиабатически, так как турбина хорошо изолирована и внешние тепловые потери практически исключаются.

Совершив работу в турбине, пар поступает в конденсатор.

Чем ниже конечное давление пара, тем большую работу при данных начальных параметрах совершает пар. Для понижения давления пара ниже атмосферного его нужно направлять из турбины в особое герметически изолированное устройство, называемое конденсатором, где путем охлаждения пар конденсируют. При этом температура конденсата равна температуре пара, из которого получен конденсат. Отнятие тепла от пара происходит в процессе при постоянном давлении ($p = \text{const}$).

Для паровых турбин применяют только поверхностные конденсаторы. Такой конденсатор приведен на рис. 2.2, он состоит из цилиндрического барабана-корпуса 1 с двумя крышками 4 по торцам; в оба конца барабана вделаны две металлические трубные доски 2, в которых закреплено большое число трубок 3.

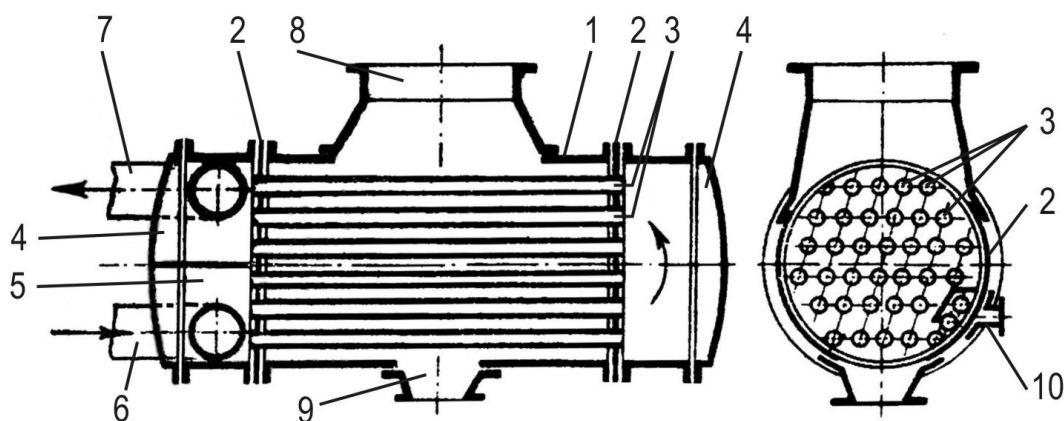


Рис. 2.2. Разрез конденсатора паровой турбины

Пар из турбины поступает в конденсатор через патрубок 8 и окружает трубки, по которым движется вода. Через патрубок 6 в пространство 5 поступает вода, забираемая из реки или какого-либо другого источника водоснабжения; по нижним трубкам она движется в сторону правой крышки, а по выходе из них по трубкам верхней половины конденсатора движется влево. Охлаждая трубки, вода отнимает через их поверхность тепло от пара, который конденсируется, т. е. превращается в воду, которая называется конденсатом. Конденсат стекает в нижнюю часть конденсатора, и отсюда через патрубок 9 его откачивают насосом. Подогретая теплом, отнятым от пара, вода выходит из патрубка 7 и возвращается в источник водоснабжения. Вода, используемая для охлаждения пара в конденсаторе, называется циркуляционной водой, а насос, который подает ее в конденсатор, – циркуляционным насосом.

Возможно применение таких конденсаторов, в которых пар и охлаждающая вода смешиваются. Такие конденсаторы называются смешивающими.

Воздух, неизбежно проникающий в конденсатор с паром и через неплотности, необходимо отсасывать. Отсос воздуха с незначительным количеством пара производится через патрубок 10 с помощью пароструйного насоса, называемого эжектором.

Если вблизи электростанции нет проточной воды, циркуляционную воду из конденсатора направляют в охлаждающие устройства (градирни, пруды, брызгальные бассейны) и потом возвращают ее в конденсатор через патрубок 6.

В конденсаторах паровых турбин поддерживают давление 2,9 – 4,9 кПа (0,03 – 0,05 кгс/см²). Из таблиц насыщенного пара видно, что при этих давлениях температура пара, а следовательно, и конденсата составляет 24 – 33 °С.

Тепловой баланс конденсатора можно выразить уравнением [3]

$$D_K = (i_2 - i_K) = W_K (i_2^B - i_1^B), \quad (2.1)$$

где D_K и W_K – соответственно количество пара и количество циркуляционной воды, поступающих в конденсатор; $i_2 - i_K$ – разность энтальпий пара и

конденсата; $i_2^B - i_1^B$ – разность энтальпий циркуляционной воды, выходящей из конденсатора и входящей в него. Значения i_2^B и i_1^B определяют по таблицам водяного пара по соответствующим температурам воды; i_K – по таблицам водяного пара при P_2 ; i_2 – по тепловому расчету процесса расширения пара в турбине.

Уравнение теплового баланса конденсатора позволяет определить количество циркуляционной воды, требующейся для конденсации 1 кг пара и поступающей в конденсатор.

Отношение масс пара и циркуляционной воды называют кратностью охлаждения и обозначают буквой m :

$$m = \frac{W_K}{D_K}. \quad (2.2)$$

Выполняют конденсаторы одно-, двух-, трех- и четырех ходовые. Значения m могут изменяться в пределах от 40 до 120, но обычно составляют 50-60.

2.2. Схема производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ с турбинами с регулируемыми отборами

На современных тепловых электрических станциях применяются различные методы повышения их экономичности: повышают давление P_1 и температуру пара t_1 перед турбиной, снижают давление P_2 за турбиной, а также применяется промежуточный перегрев пара. На всех видах конденсационных турбин применяется регенерация, дающая экономию топлива 5–12 %. Но самую большую экономию энергии, как будет показано ниже, дает *теплофикация* [2].

На рис. 2.3 дана схема ТЭЦ с одним отопительным регулируемым отбором пара (промышленный отбор не совмещается с отопительным из-за больших давлений в нем (до 1,5 МПа) и в данной методике не рассматривается). В отопительном отборе давление не превышает 0,25 МПа.

Перегретый пар, вырабатываемый в котле 1 с перегревателем, поступает в турбину 2, состоящую из двух цилиндров: цилиндра высокого давления (ЦВД - эквивалент ЧВД) и цилиндра низкого давления (ЦНД - эквивалент ЧНД). Между ЦВД и ЦНД имеется патрубков для регулируемого отбора пара. Все количество пара D_B после прохождения через ЦВД разделяется на два потока. Один поток (его будем обозначать $D_{отб}$) через патрубков регулируемого отбора поступает в устройство 8, которое условно изображает внешний тепловой потребитель (теплофикационный пароводяной поверхностный подогреватель), и в регенеративный подогреватель 7. Другой поток, его будем обозначать D_K , следует в ЦНД и затем в конденсатор 3.

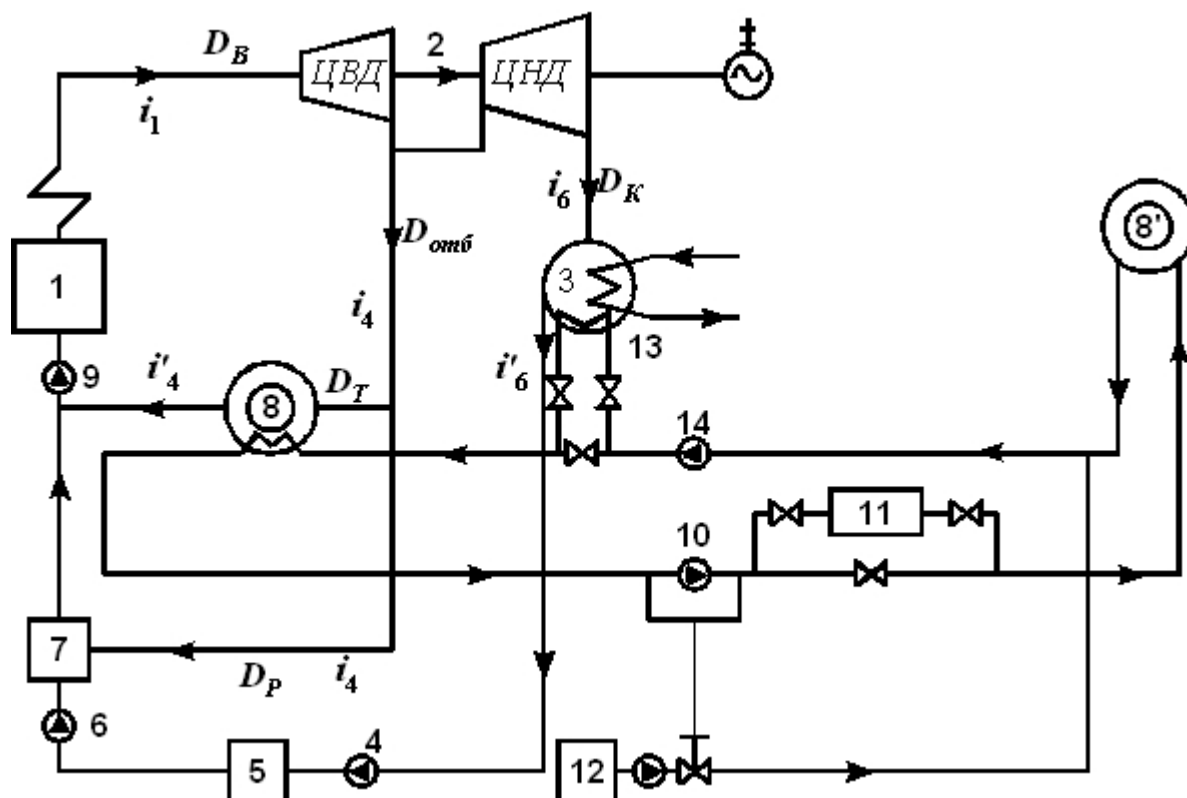


Рис. 2.3. Тепловая схема паротурбинной установки с одним регулируемым отбором

Таким образом,

$$D_B = D_{отб} + D_K, \quad (2.3)$$

Если количество пара, идущее к внешнему потребителю, равно D_T , а в систему регенерации поступает D_P , то

$$D_{отб} = D_T + D_P. \quad (2.4)$$

Подставляя в (2.3) значение $D_{отб}$ из (2.4), получаем:

$$D_B = D_T + D_P + D_K. \quad (2.5)$$

Уравнение (2.5) отражает материальный баланс установки.

Пар в количестве D_K поступает в ЦНД и выходит из него с параметрами P_6 и i_6 , а затем следует конденсатор 3. Из последнего выходит конденсат в количестве D_K с энтальпией i'_6 и конденсатным насосом 4 направляется в питательный бак (деаэратор) 5, из которого насосом 6 подается в регенеративный подогреватель 7, куда поступает и пар из отбора с энтальпией i_4 (действительное состояние пара в отборе). Количество пара D_P должно быть таким, чтобы весь конденсат был нагрет до $t_{отб}$ – температуры насыщения при давлении отбора $P_{отб}$. Пар из отбора при этом конденсируется, и общее количество конден-

сата, покидающего регенеративный подогреватель при энтальпии i'_4 , составляет $D_K + D_P$. Пар, поступивший к тепловому потребителю, вследствие отдачи тепла конденсируется, и конденсат с энтальпией i'_4 при выходе из теплового потребителя смешивается с конденсатом такой же энтальпии, поступающим из регенеративного подогревателя. Суммарное количество конденсата составляет $D_K + D_P + D_T$ и согласно формуле (2.5) равно D_B . Это количество конденсата, равное количеству пара D_B , которое возвратилось в котел.

На схеме также рассмотрена водяная система теплоснабжения. Сетевая вода после теплофикационного пароводяного подогревателя (теплопотребитель 8) с максимальной температурой порядка 120 °С (в зависимости от температурного графика) по тепловой сети поступает к абонентам 8' и расходуется на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение. При необходимости получения более высокой температуры вода догревается в пиковом водогрейном котле 11. Обратная сетевая вода (система теплоснабжения обычно выполняется двухтрубная), имеющая в различные периоды температуру 40 – 70 °С, подогревается дополнительно в теплофикационном пучке 13 конденсатора, что обеспечивает наиболее полное использование тепла отработавшего пара низкого давления. Для этого требуется повышенное давление пара в конденсаторе. Наибольшие давления в конденсаторе устанавливаются, главным образом, в зимний период, когда турбина развивает полную электрическую мощность на базе теплофикационного отбора пара. В связи с этим подогрев сетевой воды в теплофикационном пучке выгоднее производить в холодное время года, в остальное время – использовать теплофикационный пучок для подогрева холодной воды. Если теплофикационный пучок постоянно используется для подогрева сетевой воды, давление в конденсаторе должно выдерживаться от 0,012 до 0,045 МПа. Циркуляция воды в сетях и подогревателях обеспечивается сетевым 10 и вспомогательным 14 насосами. Утечка воды в тепловых сетях восполняется системой подпитки 12.

2.3. Термодинамический расчет комбинированной схемы производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ

2.3.1. Построение i - S - диаграммы

Получим выражения, позволяющие определять значения энтальпий пара после ЦВД и ЦНД.

Отношение

$$\frac{i_1 - i_4}{i_1 - i_3} = \eta_{oi}' \quad (2.6)$$

измеряет *внутренний относительный* КПД ЦВД.

Отношение

$$\frac{i_4 - i_6}{i_4 - i_5} = \eta_{oi}'' \quad (2.7)$$

равно *внутреннему относительному* КПД ЦНД.

Из уравнений (2.6) и (2.7) находим:

$$i_4 = i_1 - (i_1 - i_3) \eta_{oi}' ; \quad (2.8)$$

$$i_6 = i_4 - (i_4 - i_5) \eta_{oi}'' . \quad (2.9)$$

Значения η_{oi}' и η_{oi}'' принимаются по табл. П.1. Порядок определения величин i_3 , i_5 приведен ниже.

Построение процессов изменения состояний пара в i - S - диаграмме осуществляется следующим образом.

1. По данным табл. П.1 на i - S - диаграмме водяного пара определяется местоположение точки 1. Точка 1 строится на пересечении изобары P_1 и изотермы t_1 . Затем определяются все остальные параметры в точке 1 (энтальпия, энтропия и удельный объем пара) по диаграмме.
2. На пересечении энтропии S_1 и изобары $P_2 = P_K$, взятой из табл. П.1, на i - S диаграмме строится точка 2 и определяются её остальные параметры (энтальпия, энтропия, удельный объем пара, температура и степень сухости).
3. Точка 3 находится на пересечении энтропии S_1 и изобары $P_{омб}$, принимаемой по табл. П.1. После построения точки 3 находятся все остальные параметры (энтальпия, энтропия, удельный объем пара, температура, степень сухости, если пар в точке 3 влажный).
4. Вычисляется энтальпия в точке 4 по формуле (2.8). На пересечении линии $i_4 = \text{const}$ и изобары $P_{омб}$ находится точка 4 и определяются её остальные параметры (энтропия, удельный объем пара, температура, степень сухости, если пар в точке 4 влажный).
5. Точка 5 находится на пересечении изоэнтропы S_4 и изобары $P_2 = P_K$. Затем определяются все параметры точки 5 (энтальпия, энтропия, удельный объем пара, степень сухости).
6. Вычисляется энтальпия в точке 6 по формуле (2.9). На пересечении линии $i_6 = \text{const}$ и изобары $P_2 = P_K$ находится точка 6 и определяются её остальные параметры (энтропия, удельный объем пара, степень сухости).

Процессы изменения состояния пара в i - S - диаграмме строятся в масштабе, выбираемом студентом. На рис. 2.4. представлены возможные варианты i - S - диаграмм в соответствии с заданиями табл.П.1.

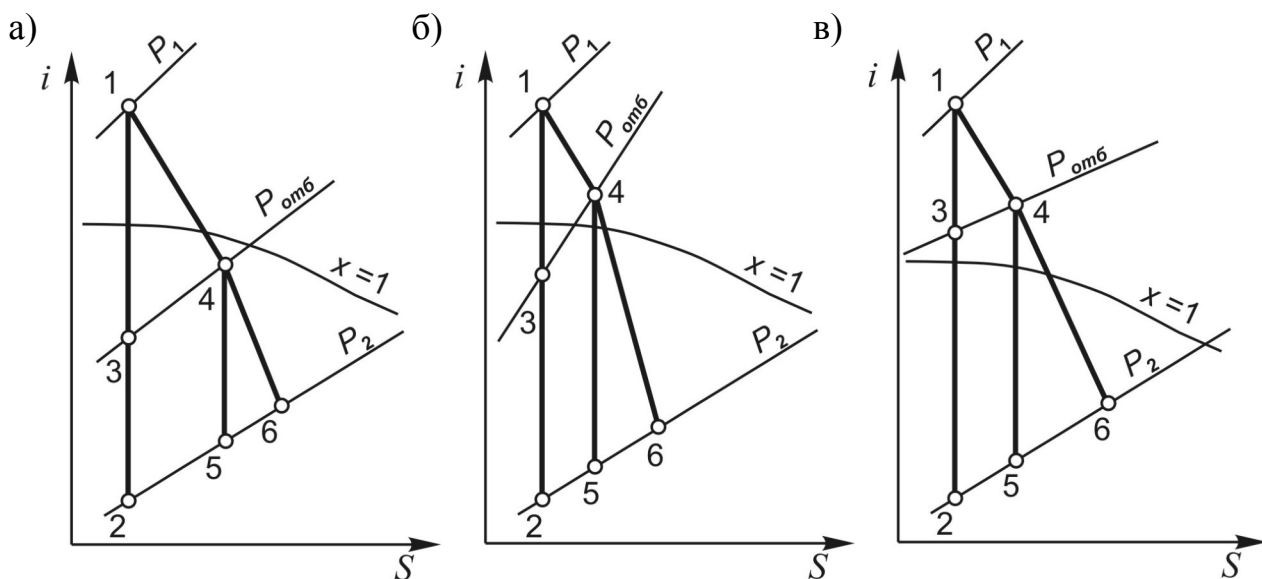


Рис. 2.4. Изменение состояния пара в турбине с одним регулируемым отбором пара в i - S - диаграмме:
а – при выходе из отбора влажного насыщенного пара; б – то же, перегретого пара;
в – то же, перегретого пара как в реальном, так и в идеальном процессе

В целях проверки правильности определения параметров по диаграмме рекомендуется определять параметры пара согласно следующим формулам:

энтальпию

$$i_x = i' + rx; \quad (2.10)$$

удельный объем

$$v_x = v''x + (1-x)v'; \quad (2.11)$$

энтропию

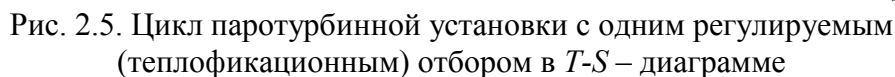
$$S_x = S' + \frac{r}{t_h + 273,15}x. \quad (2.12)$$

Значения r , i' , v'' , v' , S' , t_h определяются согласно табл. П.3, а значение параметра степени сухости x известно из построенной диаграммы.

2.3.2. Построение T - S - диаграммы

T - S - диаграмма – это тепловая диаграмма, в которой удобно представлять и анализировать циклы различных тепловых установок [4].

На рис. 2.5 представлен цикл паротурбинной установки с одним регулируемым отбором для одного из возможных случаев, когда пар из отбора выходит во влажном состоянии.



Вода, поступающая в котел, сухой насыщенный и перегретый пар имеют одинаковое постоянное давление P_1 . В процессе 9–10 происходит испарение и в точке 10 образуется сухой насыщенный пар. В процессе 9–10 происходит подвод части теплоты сжигаемого в котле топлива. Количество подводимой теплоты определяется скрытой теплотой парообразования r при P_1 . Процесс 10 – 1 – перегрев пара в пароперегревателе. Перегретый пар расширяется в турби-

не адиабатно (процесс 1 – 2). Расстояние 1 – 3 характеризует расширение пара в ЦВД без потерь, а процесс 3 – 2 – в ЦНД. Процесс 1–4 - действительный процесс с теплотерями в ЦВД турбины, а процесс 4 – 6 - реальный процесс в ЦНД с учетом теплотер и отбора пара на теплофикацию (а также и на регенерацию). Отработавший в турбине пар поступает в конденсатор (точка 6), где конденсируется при постоянном давлении и температуре, отдавая скрытую теплоту конденсации охлаждающей циркуляционной воде (процесс 6 – 7), и в точке 7 превращается в воду (конденсат). Процесс повышения давления конденсата насосом принят идеальным (температура и энтропия не изменяются). Процесс возврата конденсата в котел с учетом подогрева в регенеративном подогревателе (точка 8) совпадает с пограничной кривой $x = 0$.

2.4. Определение термодинамических и технико-экономических параметров

2.4.1. Конденсационный режим работы турбины

При работе в конденсационном режиме ($D_{отб} = 0$) турбина развивает номинальную мощность, а весь пар проходит последовательно ЧВД, ЧНД и поступает в конденсатор. Расход пара на турбину D_B^H , кг/с, на номинальном режиме без отбора составит [3]

$$D_B^H = d_{\text{э}} N_H, \quad (2.13)$$

где $d_{\text{э}}$ – удельный расход пара на турбину для выработки номинальной мощности. В единицах СИ $[d_{\text{э}}] = \text{кг/Дж}$. Однако относить этот расход к очень малой единице энергии Дж неудобно и практически удельный расход пара относят к 1 кВт·ч, полученному на зажимах генератора и условно называемому электрическим *киловатт-часом*. Таким образом, получается внесистемная единица удельного расхода пара $[d_{\text{э}}] = \text{кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Соотношение между системной и внесистемной единицами получается так:

$$1 \text{ кг/Дж} = 1 \text{ кг}/(\text{Вт} \cdot \text{с}) = 1 \cdot \frac{1000 \cdot 3600}{1 \cdot 1} \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}) = 3,6 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч}),$$

т. е. $1 \text{ кг/Дж} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$;

N_H – номинальная мощность турбины, кВт (принимается по табл. П.1).

Удельный расход пара на турбину для выработки номинальной мощности определяется по формуле

$$d_{\text{э}} = \frac{1}{(i_1 - i_6) \eta_M \eta_{\text{эл}}}, \text{ кг/кДж}, \quad (2.14)$$

где i_1 – энтальпия пара на входе в турбину в ЧВД, кДж/кг; i_6 – энтальпия пара на выходе из ЧНД, кДж/кг; η_M – механический КПД турбины; $\eta_{эл}$ – КПД электрогенератора.

Параметры i_1 и i_6 известны из расчетов, а величины $\eta_M, \eta_{эл}$ принимаются по табл. П.1.

2.4.2. Работа турбины с отбором

Если из патрубка отбора взято количество пара ($D_{отб} \neq 0$), то мощность турбины станет меньше, так как отобранный пар не совершит работы в ЦНД. Чтобы компенсировать эту недовыработку полезной энергии, нужно в турбину ввести дополнительное количество пара вместо взятого из отбора; это количество пара будет меньше взятого из отбора, так как он будет расширяться как в ЦВД, так и в ЦНД. Дополнительное количество пара определяют как долю β от $D_{отб}$. Таким образом, при наличии отбора $D_{отб}$ количество пара D_B составит

$$D_B = d_{\mathcal{O}} N + \beta D_{отб}. \quad (2.15)$$

Коэффициент β , называемый коэффициентом *недовыработки*, характеризует долю работы, не совершенную паром из отбора в ЦНД.

При номинальном режиме полный расход пара на турбину составит

$$D_B^H = d_{\mathcal{O}} N_H + \beta D_{отб}^H, \quad (2.16)$$

где $d_{\mathcal{O}}$ определяется по уравнению (2.14).

Коэффициент β определяется по выражению

$$\beta = \frac{i_4 - i_6}{i_1 - i_6}. \quad (2.17)$$

Числитель в этой зависимости характеризует недовыработку 1 кг пара в ЦНД, знаменатель – выработку 1 кг пара по всей турбине.

Определив максимальный расход пара D_B^H , который может получить турбина при известных β и $D_{отб}^H$, определяют расход пара на регенерацию D_P .

Расход пара на регенерацию рассчитывается на основе теплового баланса смешивающего регенеративного подогревателя: полная энтальпия рабочих тел (пара из отбора и конденсата из конденсатора), поступающих в подогреватель, равна полной энтальпии рабочего тела, выходящего из подогревателя (при номинальном режиме):

$$D_P^H i_4 + D_K^H i'_6 = (D_P^H + D_K^H) i'_4. \quad (2.18)$$

Из уравнения баланса выразим D_p^H :

$$D_p^H = \frac{D_K^H (i'_4 - i'_6)}{i_4 - i'_4}, \quad (2.19)$$

где i'_4 и i'_6 - энтальпия кипящей жидкости при давлении $P_{отб}$ и P_K соответственно; D_K^H - расход конденсата, выходящего из конденсатора при номинальном режиме.

Величина D_K^H определяется разностью полного расхода пара на турбину D_B^H и расхода отбора $D_{отб}^H$

$$D_K^H = D_B^H - D_{отб}^H. \quad (2.20)$$

Расход пара на тепловое потребление D_T^H , кг/ч (кг/с), определяется по формуле

$$D_T^H = D_{отб}^H - D_p^H. \quad (2.21)$$

Количество тепла Q_T^H , отпущенного на теплофикацию, т. е. без учета тепла на регенерацию, Вт (Дж/с), определяется по формуле

$$Q_T^H = D_T^H (i_4 - i'_6). \quad (2.22)$$

Расход топлива на теплофикацию в единицу времени B_T^H , кг/с (кг/ч), определяется по формуле

$$B_T^H = \frac{Q_T^H}{Q_H^P \eta_\kappa}, \quad (2.23)$$

где Q_H^P - низшая теплота сгорания топлива, принимаемая равной низшей теплоте сгорания условного топлива ($Q_H^P = Q_H^{y.T.} = 29300$ кДж/кг).

Общий расход топлива при номинальном режиме B^H , кг/с определяется по уравнению

$$B^H = \frac{D_B^H (i_1 - i'_4)}{Q_H^P \eta_\kappa}. \quad (2.24)$$

Расход топлива на производство электроэнергии $B_{\mathcal{E}}^H$ определяем как разность всего расхода топлива B^H и расхода топлива на теплофикацию B_T^H , кг/ч (кг/с):

$$B_{\mathfrak{E}}^H = B^H - B_T^H. \quad (2.25)$$

При таком способе распределения расхода топлива между двумя видами продукции вся выгода теплофикации, определившая расход топлива B^H , отнесена к производству электрической энергии.

Удельные расходы топлива:

- на выработку электроэнергии, кг/Дж,

$$\mathfrak{e}_{\mathfrak{E}}^H = \frac{B_{\mathfrak{E}}^H}{N_H}, \quad (2.26)$$

- на тепловое потребление, кг/Дж,

$$\mathfrak{e}_T^H = \frac{B_T^H}{Q_T^H}. \quad (2.27)$$

Коэффициенты полезного действия:

- по выработке электроэнергии

$$\eta_{TЭЦ}^{\mathfrak{E}} = \frac{N_H}{B_{\mathfrak{E}}^H Q_H^P} = \frac{1}{\mathfrak{e}_{\mathfrak{E}}^H Q_H^P}, \quad (2.28)$$

- по выработке тепловой энергии

$$\eta_{TЭЦ}^T = \frac{Q_T^H}{B_T^H Q_H^P} = \frac{1}{\mathfrak{e}_T^H Q_H^P}. \quad (2.29)$$

На ТЭЦ пользуются экономическим показателем, в котором в числителе суммируются полезная выработанная электрическая энергия и отпущенная тепловая энергия. Эту сумму относят к теплу, выделившемуся при горении топлива, и называют *коэффициентом использования тепла топлива*

$$k = \frac{N_H + Q_T^H}{B^H Q_H^P}. \quad (2.30)$$

3. РАЗДЕЛЬНАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА КЭС И В РАЙОННЫХ КОТЕЛЬНЫХ

3.1. Построение процессов водяного пара в конденсационной турбине

Процесс расширения водяного пара в конденсационной турбине без отбора показан в i - S - диаграмме на рис. 3.1, а.

В паровой турбине рабочее тело движется с большими скоростями и соприкасается с поверхностями ее деталей; вследствие этого как внутри самограбочего тела, так и при соприкосновении с металлическими поверхностями возникает трение. На преодоление трения тратится часть полезной энергии, и поэтому работа 1 кг пара будет меньше, чем работа идеальной (без потерь) турбины $h_0 = i_1 - i_2$. Процесс расширения рабочего тела с учетом потерь на трение показан на рис. 3.1, б. Энтальпия пара в конце реального процесса расширения (точка 6) обозначается i_6 , а внутренняя работа 1 кг пара с учетом потерь на трение (ее обозначают h_i) составит

$$h_i = i_1 - i_6. \quad (3.1)$$

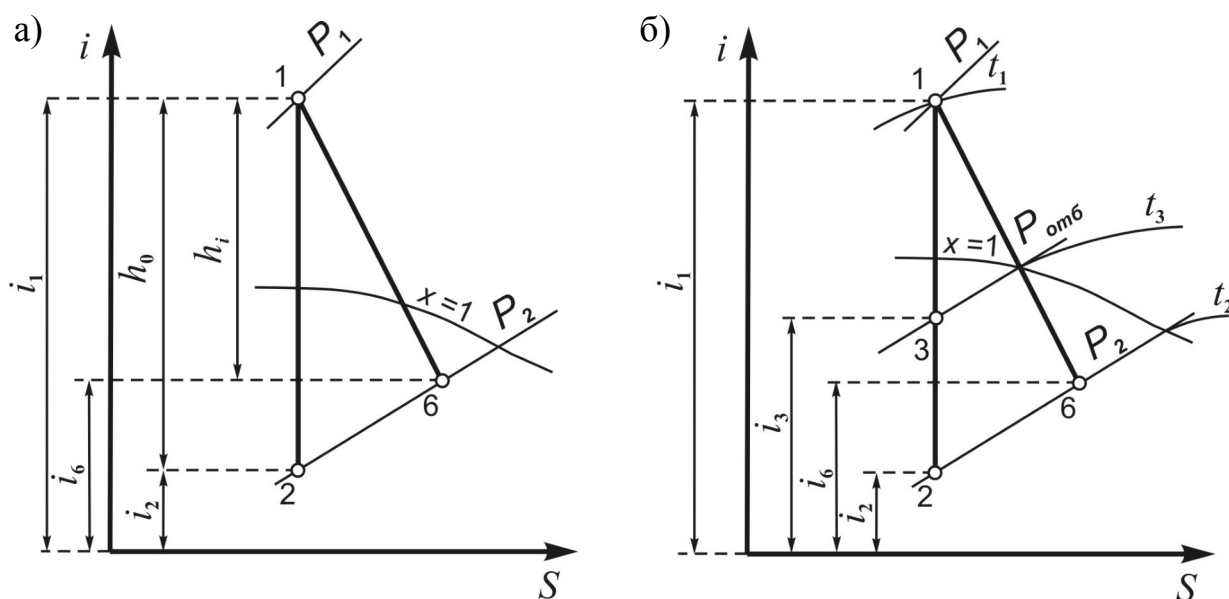


Рис. 3.1. Процесс расширения рабочего тела с учетом потерь на трение:
а – без регенерации; б – с регенерацией

Сравнение работы идеального двигателя h_0 и внутренней работы h_i действительного двигателя производится по КПД, который называется внутренним относительным КПД турбины:

$$\eta_{oi} = \frac{h_i}{h_0} = \frac{i_1 - i_6}{i_1 - i_2}. \quad (3.2)$$

Знание значения внутреннего относительного КПД дает возможность определить в i - S диаграмме точку, характеризующую состояние, а следовательно, и степень сухости (и другие параметры) пара, выходящего из турбины. Значение энтальпии пара после расширения в турбине определяется из выражения (3.2):

$$i_6 = i_1 - h_0 \eta_{oi} = i_1 - (i_1 - i_2) \eta_{oi}. \quad (3.3)$$

На i - S диаграмме откладывают значение i_6 и проводят горизонтальную линию $i_6 = \text{const}$; степень сухости в точке 6 не должна быть меньше 0,9, чтобы исключить эрозионный износ рабочих лопаток последних ступеней.

На рис. 3.1, б проведена изобара регенеративного отбора пара, совпадающая с изобарой регулируемого отбора.

3.2. Определение термодинамических и технико-экономических параметров КЭС и районных котельных

Тепловую и электрическую энергию получают в данном случае не в комбинированном процессе (на ТЭЦ), а отдельно.

Схемы отдельных установок показаны на рис. 3.2 – 3.3.

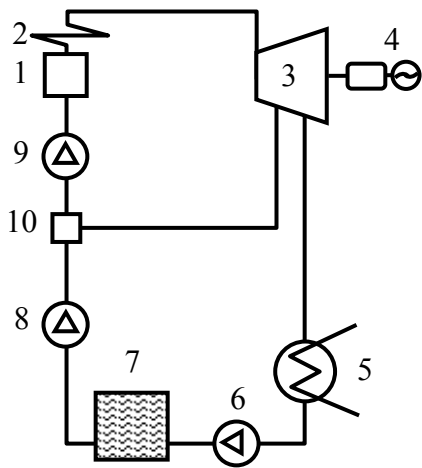


Рис. 3.2. Схема простейшей КЭС:
1 – паровой котел; 2 – пароперегреватель;
3 – паровая турбина; 4 – электрический генератор; 5 – конденсатор; 6, 8, 9 – насосы;
7 – питательный бак; 10 – подогреватель

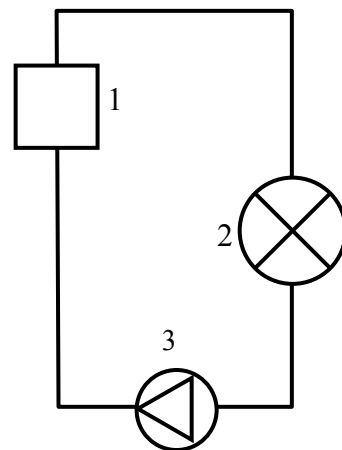


Рис. 3.3. Принципиальная схема системы теплоснабжения от котельной:
1 – паровой котел;
2 – тепловой потребитель; 3 – насос

Для вычисления удельного расхода пара d_3 на турбину нужно определить внутреннюю работу 1 кг пара при наличии регенерации, для чего предварительно определяется доля отбора α на регенерацию. Она определяется из уравнения баланса смешивающего подогревателя 10 (рис. 3.2). В него поступает α кг пара из отбора с энтальпией i_4 и $(1 - \alpha)$ кг конденсата из конденсатора с энтальпией i'_6 . Из подогревателя выходит 1 кг воды с энтальпией i'_4 . Уравнение баланса подогревателя имеет вид

$$i'_4 = \alpha i_4 + (1 - \alpha) i'_6. \quad (3.4)$$

Из выражения (3.4) находим долю отбора:

$$\alpha = \frac{i'_4 - i'_6}{i_4 - i'_6}. \quad (3.5)$$

Внутренняя работа 1 кг пара определяется по формуле

$$h_{ip} = (i_1 - i_4) + (i_4 - i_6)(1 - \alpha). \quad (3.6)$$

Удельный расход пара для выработки электроэнергии $d_{\text{ЭП}}$, кг/Дж, определяется выражением

$$d_{\text{ЭП}} = \frac{1}{h_{ip} \eta_M \eta_{\text{ЭЛ}}}. \quad (3.7)$$

Полный расход пара $D_{\text{БП}}^H$, кг/с, определяется выражением

$$D_{\text{БП}}^H = d_{\text{ЭП}} N_H. \quad (3.8)$$

Расход условного топлива на выработку электроэнергии находится из уравнения баланса парогенератора, которое имеет вид

$$B_{\text{ЭП}}^H Q_H^P \eta_{nz} = D_{\text{БП}}^H (i_1 - i'_4). \quad (3.9)$$

Из выражения (3.9) находим искомую величину расхода топлива:

$$B_{\text{ЭП}}^H = \frac{D_{\text{БП}}^H (i_1 - i'_4)}{Q_H^P \eta_{nz}}. \quad (3.10)$$

Определяем удельный расход топлива на выработку электроэнергии по формуле

$$e_{\text{ЭП}}^H = \frac{B_{\text{ЭП}}^H}{N_H}. \quad (3.11)$$

Расход условного топлива на выработку пара в котельной определяется по формуле

$$B_{\text{ТП}}^H = \frac{D_T^H (i_4 - i'_6)}{Q_H^P \eta_{nz}} = \frac{Q_T^H}{Q_H^P \eta_{nz}}. \quad (3.12)$$

Электрический коэффициент полезного действия КЭС определяется по формуле

$$\eta_{\text{КЭС}}^{\text{Э}} = \frac{N_H}{B_{\text{ЭП}}^H Q_H^P} = \frac{1}{e_{\text{ЭП}}^H Q_H^P}. \quad (3.13)$$

Общий расход топлива при раздельной выработке электрической и тепловой энергии определяется по формуле:

$$B_p^H = B_{\text{ЭР}}^H + B_{\text{ТР}}^H. \quad (3.14)$$

3.3. Анализ показателей эффективности ТЭЦ и КЭС

Анализируя произведенные расчеты, нужно сопоставить затраченное топливо обоих вариантов ТЭЦ и КЭС вместе с котельной и выработку электричества на ТЭЦ и на КЭС.

Экономия топлива в комбинированной установке по сравнению с раздельной установкой составит

$$a = \frac{B_p^H - B^H}{B_p^H} 100\%. \quad (3.15)$$

Необходимо сопоставить электрические коэффициенты полезного действия ТЭЦ и КЭС.

4. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Исходные данные, взятые из табл. П.1 по последним двум цифрам зачетной книжки, в рассматриваемом примере следующие: $N_H = 12,73$ МВт, $P_1 = 8,452$ МПа, $t_1 = 450$ °С, $\eta_{oi}'/\eta_{oi}'' = 0,81/0,86$, $P_{омб} = 410$ кПа, $P_K = P_2 = 4$ кПа, $D_{омб}^H = 7,5$ кг/с, $\eta_M = 0,83$, $\eta_{эл} = 0,91$, $\eta_K = \eta_{не} = 0,91$.

Следуя пункту 2.3.1, наносим на i - S - диаграмму водяного пара точку 1 на пересечении изобары P_1 и изотермы t_1 . Определяем остальные параметры пара по диаграмме. Они имеют следующие значения:

$$i = 3265 \text{ кДж/кг}, v = 0,036 \text{ м}^3/\text{кг}, S = 6,53 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

С целью проверки правильности найденных параметров определим их с помощью таблиц перегретого пара (см. табл. П.4). Используя механизм линейной интерполяции, получим следующие значения параметров:

$$i = \frac{3270 - 3254}{8 - 9} (8,452 - 8) + 3270 = 3262,77 \text{ кДж/кг},$$

$$v = \frac{0,03821 - 0,03354}{8 - 9} (8,452 - 8) + 0,03821 = 0,0361 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$S = \frac{6,552 - 6,481}{8 - 9} (8,452 - 8) + 6,552 = 6,52 \text{ кДж/кг}.$$

Анализируя данные, полученные разными способами, делаем вывод о том, что они достаточно близки друг к другу. С целью получения более точных результатов в дальнейшем будем использовать данные, полученные расчетом. Итак, параметры перегретого пара в точке 1 следующие:

$$P_1 = 8,452 \text{ МПа}, t_1 = 450 \text{ °С}, i_1 = 3262,77 \text{ кДж/кг},$$

$$v_1=0,0361 \text{ м}^3/\text{кг}, S_1=6,52 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

На пересечении энтропии S_1 и давления $P_2=P_K=4$ кПа на i - S - диаграмме строим точку 2. В точке 2 пар влажный насыщенный. Определим его параметры по диаграмме:

$$x=0,758, i=1960 \text{ кДж}/\text{кг}, v=30 \text{ м}^3/\text{кг}, t=25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Проверим правильность определения параметров. Из таблиц сухого насыщенного пара (см. табл. П.3) для давления $P_2=P_K=4$ кПа вспомогательные величины имеют следующие значения:

$$t_n=28,979 \text{ }^\circ\text{C}, v'=0,0010041 \text{ м}^3/\text{кг}, v''=34,81 \text{ м}^3/\text{кг}, i'=121,42 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$r=2433 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Используя формулы (2.10),(2.11), получим значения искомых параметров:

$$i_x = 121,42 + 2433 \cdot 0,758 = 1965,63 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$v_x = 34,81 + (1 - 0,758)0,0010041 = 34,81 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Параметры пара в точке 2 имеют следующие значения:

$$P_2=4 \text{ кПа}, t_2=28,979 \text{ }^\circ\text{C}, x_2=0,758, S_2=S_1=6,52 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

$$v_2=34,81 \text{ м}^3/\text{кг}, i_2=1965,63 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

На пересечении энтропии S_1 и изобары $P_{омб}=410$ кПа строится точка 3. Точка 3 лежит в области влажного насыщенного пара. Определим её параметры по диаграмме:

$$x=0,929, i=2585 \text{ кДж}/\text{кг}, v=0,46 \text{ м}^3/\text{кг}, t=141 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Проверим правильность определения параметров. Из таблиц сухого насыщенного пара (см. табл. П.3) для давления $P_{омб}=410$ кПа вспомогательные величины имеют следующие значения:

$$t_n=144,51 \text{ }^\circ\text{C}, v'=0,0010845 \text{ м}^3/\text{кг}, v''=0,4518 \text{ м}^3/\text{кг}, i'=608,5 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$r=2131 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Используя формулы (2.10),(2.11), получим значения искомых параметров:

$$i_x = 608,5 + 2131 \cdot 0,929 = 2588,2 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$v_x = 0,4518 + (1 - 0,929)0,0010845 = 0,4519 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Параметры пара в точке 3 имеют следующие значения:

$$P_3=410 \text{ кПа}, t_3=144,51 \text{ }^\circ\text{C}, x_3=0,929, S_3=S_2=S_1=6,52 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$$

$$v_3=0,4519 \text{ м}^3/\text{кг}, i_3=2588,2 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Энтальпию пара в точке 4 определяем по формуле (2.8):

$$i_4 = i_1 - (i_1 - i_3)\eta_{oi}' = 3262,77 - (3262,77 - 2588,2)0,81 = 2716,37 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Точка 4 строится на пересечении линии $i_4=2716,37$ кДж/кг и изобары $P_3=410$ кПа. Пар в точке 4 влажный насыщенный. Определим параметры по диаграмме:

$$x=0,986, v=0,46 \text{ м}^3/\text{кг}, S=6,83 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Проверим правильность определения параметров. Из таблиц сухого насыщенного пара (см. табл. П.3) для давления $P_{\text{отб}}=410$ кПа, вспомогательные величины имеют следующие значения:

$$t_n=144,51 \text{ }^\circ\text{C}, v'=0,0010845 \text{ м}^3/\text{кг}, v''=0,4518 \text{ м}^3/\text{кг}, \\ r=2131 \text{ кДж}/\text{кг}, S'=1,786 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Используя формулы (2.11), (2.12), получим значения искомых параметров:

$$v_x = 0,4518 + (1 - 0,986)0,0010845 = 0,4518 \text{ м}^3/\text{кг}, \\ S_x = 1,786 + \frac{2131}{(144,51 + 273,15)}0,986 = 6,817 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Параметры пара в точке 4 имеют следующие значения:

$$P_4=P_3=410 \text{ кПа}, t_4=t_3=144,51 \text{ }^\circ\text{C}, x_4=0,986, S_4=6,817 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \\ v_4=0,4518 \text{ м}^3/\text{кг}, i_4=2716,37 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Точка 5 находится на пересечении изоэнтропы S_4 и изобары $P_2=P_K=4$ кПа. В точке 5 пар влажный насыщенный. Определим его параметры по диаграмме:

$$x=0,798, i=2060 \text{ кДж}/\text{кг}, v=31 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При проверке достоверности определения параметров точки 5 пользуемся справочными данными точки 2, т.к. они лежат на одной изобаре.

Используя формулы (2.10), (2.11), получим значения искомых параметров:

$$i_x = 121,42 + 2433 \cdot 0,798 = 2062,95 \text{ кДж}/\text{кг}, \\ v_x = 34,81 + (1 - 0,798)0,0010041 = 34,81 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Параметры пара в точке 5 имеют следующие значения:

$$P_5=P_2=4 \text{ кПа}, t_5=t_2=28,979 \text{ }^\circ\text{C}, x_5=0,798, S_5=S_4=6,817 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \\ v_5=34,81 \text{ м}^3/\text{кг}, i_5=2062,95 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Энтальпию пара в точке 6 определяем по формуле (2.9):

$$i_6 = 2716,37 - (2716,37 - 2062,95)0,86 = 2154,42 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Точка 6 строится на пересечении линии $i_6=2154,42$ кДж/кг и изобары $P_2=4$ кПа. Пар в точке 6 влажный насыщенный. Определим параметры по диаграмме:

$$x=0,835, v=32 \text{ м}^3/\text{кг}, S=7,15 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

При проверке достоверности определения параметров точки 6 пользуемся справочными данными точки 2, т.к. они лежат на одной изобаре:

$$t_H=28,979 \text{ }^\circ\text{C}, v'=0,0010041 \text{ м}^3/\text{кг}, v''=34,81 \text{ м}^3/\text{кг}, i'=121,42 \text{ кДж}/\text{кг},$$

$$r=2433 \text{ кДж}/\text{кг}, S'=0,4225 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Используя формулы (2.11),(2.12), получим значения искомых параметров:

$$v_x = 34,81 + (1 - 0,835)0,0010041 = 34,81 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$S_x = 0,4225 + \frac{2433}{(28,979 + 273,15)}0,835 = 7,15 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Параметры пара в точке 6 имеют следующие значения:

$$P_6=P_5=P_2=4 \text{ кПа}, t_6=t_5=t_2=28,979 \text{ }^\circ\text{C}, x_6=0,835, S_6=7,15 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}), \\ v_6=34,81 \text{ м}^3/\text{кг}, i_6=2454,42 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Для удобства построения i - S - диаграммы все параметры точек сведем в таблицу (см. табл. 4.1).

Табл. 4.1

Параметры водяного пара в соответствующих точках

№ точки	P , МПа	t , $^\circ\text{C}$	v , $\text{м}^3/\text{кг}$	x	i , $\text{кДж}/\text{кг}$	S , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
1	8,452	450	0,0361	-	3262,77	6,52
2	0,004	28,979	34,81	0,758	1965,63	6,52
3	0,41	144,51	0,4519	0,929	2588,2	6,52
4	0,41	144,51	0,4518	0,986	2716,37	6,817
5	0,004	28,979	34,81	0,798	2062,95	6,817
6	0,004	28,979	34,81	0,835	2454,42	7,15

По данным табл. 4.1 строим процессы изменения состояния водяного пара в i - S - диаграмме (рис. 4.1).

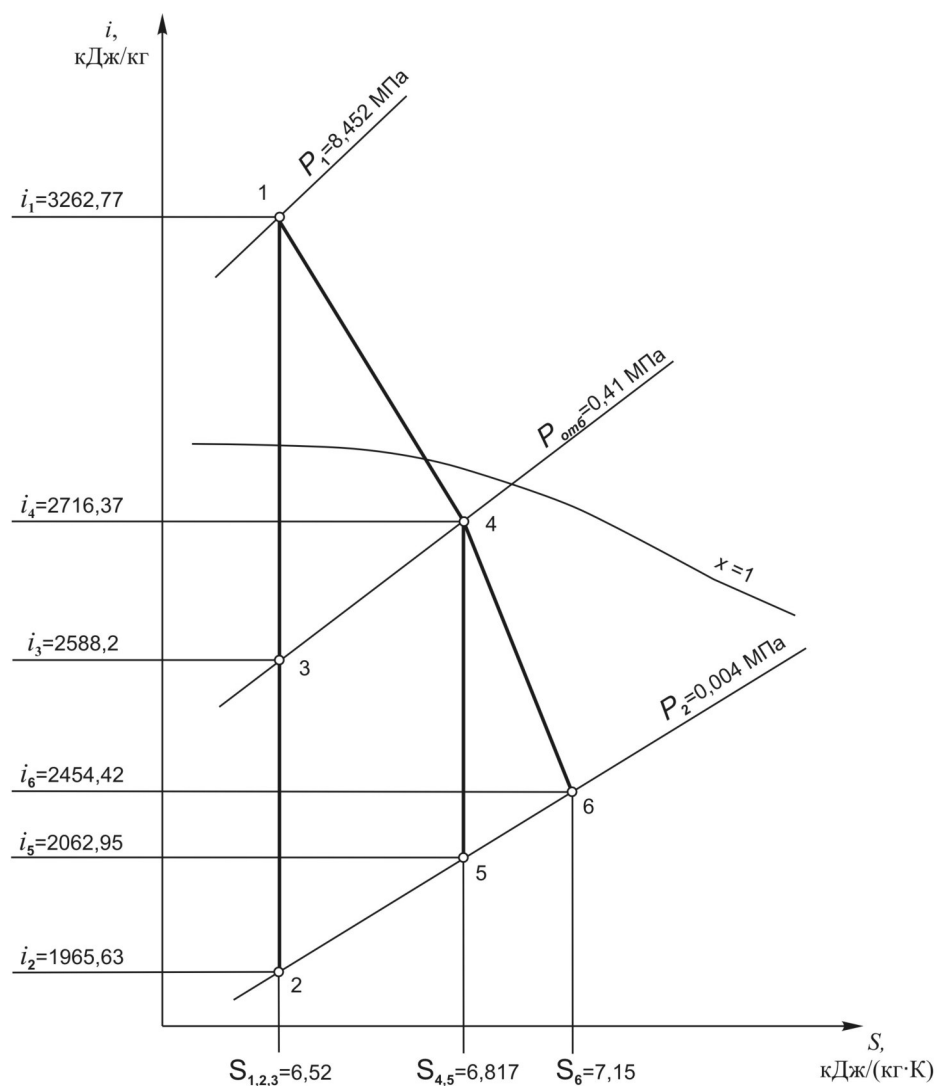


Рис. 4.1. Изменение состояния водяного пара в i - S - диаграмме

После построения i - S - диаграммы переходим к построению T - S диаграммы изменения состояния водяного пара. Для построения диаграммы необходимо знать параметры точек 7,8,9,10. Следуя пункту 2.3.2, определим параметры искомых точек для рассматриваемого случая и сведем их значения в табл. 4.2. При определении значений параметров в точках 9 и 10 использован механизм линейной интерполяции.

Табл. 4.2

Параметры водяного пара в точках 7,8,9,10

№ точки	P , МПа	t , °C	x	S , кДж/(кг·К)
7	0,004	28,979	0	0,4225
8	0,41	144,51	0	1,786
9	8,452	298,83	0	3,244
10	8,452	298,83	1	5,714

T - S - диаграмма изменения состояния водяного пара представлена на рис. 4.2.

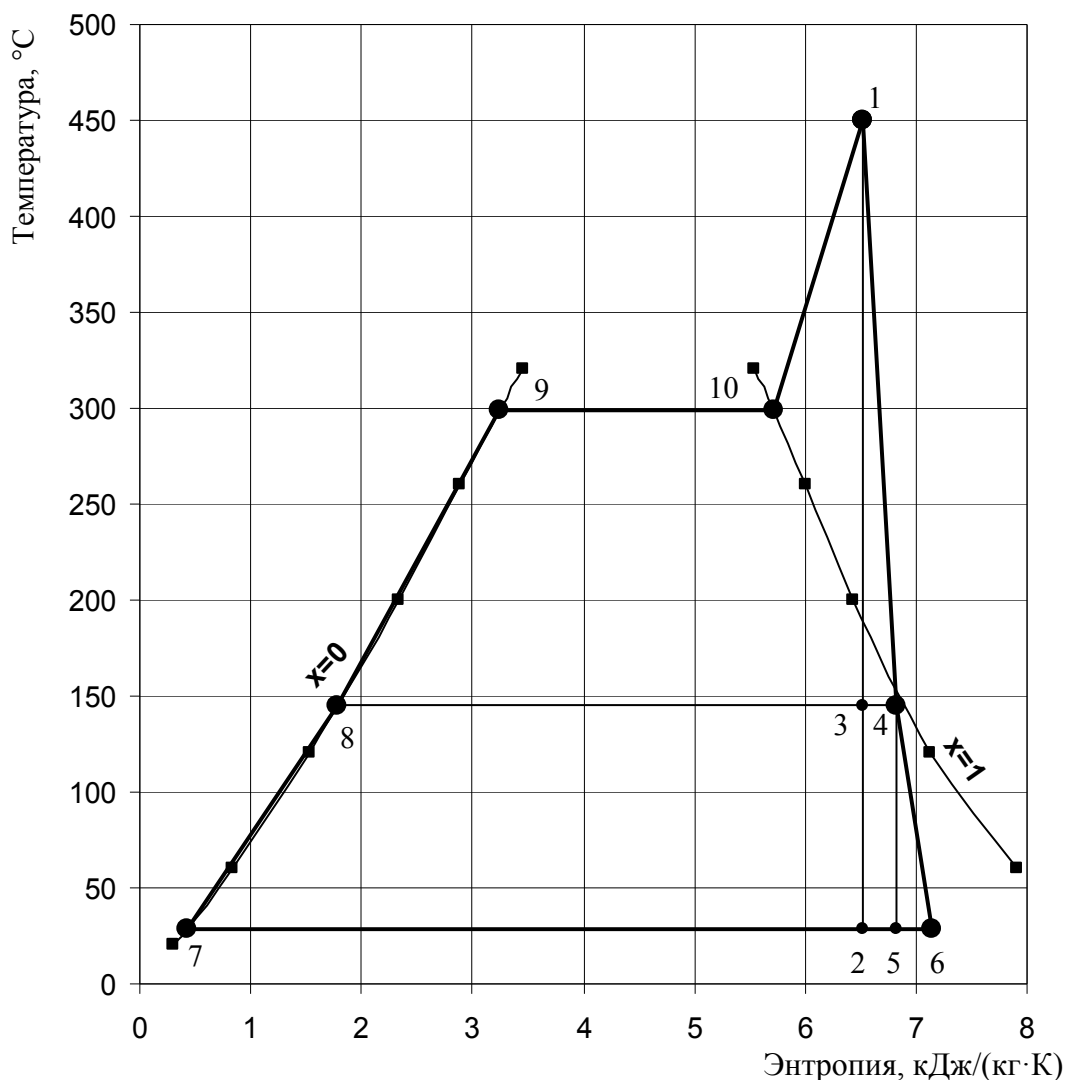


Рис. 4.2. Изменение состояния водяного пара в T - S - диаграмме

Рекомендуется на T - S - диаграмме изобразить фрагменты пограничных кривых $x=0$ и $x=1$. Их можно построить, задав значения промежуточных температур и определив для них по табл. П.2 значения энтропии кипящей воды и сухого насыщенного пара. В представленном примере рассматривались следующие температуры: 20, 60, 120, 200, 260, 320 °С.

После построения диаграмм изменения состояния водяного пара переходим к определению термодинамических и технико-экономических параметров комбинированного цикла.

Определим удельный расход пара на турбину при номинальном режиме без отбора, при работе в конденсационном режиме d_3^H (см. п.2.4.1) по формуле (2.14):

$$d_{\vartheta}^H = \frac{1}{(i_1 - i_6)\eta_M\eta_{эл}} = \frac{1}{(3262,77 - 2454,42)0,83 \cdot 0,91} = 0,001638 \text{ кг/кДж} =$$

$$= 0,001638 \cdot 3,6 \cdot 10^3 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)} = 5,8968 \text{ кг/(кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Полный расход пара, согласно выражению (2.13), составит

$$D_B^H = d_{\vartheta}^H N_H = 0,001638 \cdot 12730 = 20,852 \text{ кг/с} = 75,067 \text{ т/ч}.$$

Определим показатели паротурбинной установки при работе в номинальном режиме с отбором.

Коэффициент β определяется по выражению (2.17):

$$\beta = \frac{i_4 - i_6}{i_1 - i_6} = \frac{2716,37 - 2454,42}{3262,77 - 2454,42} = 0,324.$$

Полный расход пара на турбину при номинальном режиме, согласно формуле (2.16), составит

$$D_B^H = d_{\vartheta}^H N_H + \beta D_{омб}^H = 0,001638 \cdot 12730 + 0,324 \cdot 7,5 = 23,282 \text{ кг/с} = 83,815 \text{ т/ч}.$$

Расход конденсата, выходящего из конденсатора при номинальном режиме D_K^H , определяем согласно (2.20):

$$D_K^H = D_B^H - D_{омб}^H = 23,282 - 7,5 = 15,782 \text{ кг/с} = 56,815 \text{ т/ч}.$$

Расход пара на регенерацию при номинальном режиме D_P^H определим согласно (2.19), предварительно определив согласно табл. П.3 энтальпии кипящей жидкости при давлении отбора ($P_{омб} = 410 \text{ кПа}$) i'_4 и давлении в конденсаторе ($P_K = 4 \text{ кПа}$) i'_6 :

$$D_P^H = \frac{D_K^H (i'_4 - i'_6)}{i_4 - i'_4} = \frac{15,782(608,5 - 121,42)}{2716,37 - 608,5} = 3,647 \text{ кг/с}.$$

Расход пара на тепловое потребление D_T^H определяем согласно (2.21):

$$D_T^H = D_{омб}^H - D_P^H = 7,5 - 3,547 = 3,853 \text{ кг/с}.$$

Согласно (2.22) определяем количество тепла Q_T^H , отпущенного на теплофикацию:

$$Q_T^H = D_T^H (i_4 - i'_6) = 3,853(2716,53 - 121,42) = 9998,34 \text{ кВт}.$$

Расход топлива на теплофикацию B_T^H определяем по формуле (2.23):

$$B_T^H = \frac{Q_T^H}{Q_H^P \eta_{\kappa}} = \frac{9998,34}{29300 \cdot 0,91} = 0,375 \text{ кг/с}.$$

Общий расход топлива на номинальном режиме B^H определяем согласно (2.24):

$$B^H = \frac{D_B^H (i_1 - i'_4)}{Q_H^P \eta_k} = \frac{23,282(3262,77 - 608,5)}{29300 \cdot 0,91} = 2,318 \text{ кг/с.}$$

Расход топлива на производство электроэнергии $B_{\mathfrak{E}}^H$ определяем согласно (2.25):

$$B_{\mathfrak{E}}^H = B^H - B_T^H = 2,318 - 0,375 = 1,943 \text{ кг/с.}$$

Удельные расходы топлива на выработку электроэнергии $\mathfrak{e}_{\mathfrak{E}}^H$ и на тепловое потребление $\mathfrak{e}_T^H$ определим согласно выражениям (2.26) и (2.27):

$$\mathfrak{e}_{\mathfrak{E}}^H = \frac{B_{\mathfrak{E}}^H}{N_H} = \frac{1,943}{12730} = 152,63 \cdot 10^{-6} \text{ кг/кДж,}$$

$$\mathfrak{e}_T^H = \frac{B_T^H}{Q_T^H} = \frac{0,375}{9998,34} = 37,506 \cdot 10^{-6} \text{ кг/кДж.}$$

Коэффициенты полезного действия по выработке электрической $\eta_{TЭЦ}^{\mathfrak{E}}$ и тепловой $\eta_{TЭЦ}^T$ энергии при номинальном режиме работы определяем согласно (2.28) и (2.29):

$$\eta_{TЭЦ}^{\mathfrak{E}} = \frac{N_H}{B_{\mathfrak{E}}^H Q_H^P} = \frac{1}{\mathfrak{e}_{\mathfrak{E}}^H Q_H^P} = \frac{1}{152,63 \cdot 10^{-6} \cdot 29300} = 0,2236,$$

$$\eta_{TЭЦ}^T = \frac{Q_T^H}{B_T^H Q_H^P} = \frac{1}{\mathfrak{e}_T^H Q_H^P} = \frac{1}{37,506 \cdot 10^{-6} \cdot 29300} = 0,91.$$

Коэффициент использования тепла топлива определим согласно (2.30):

$$k = \frac{N_H + Q_T^H}{B^H Q_H^P} = \frac{12730 + 9998,34}{2,318 \cdot 29300} = 0,3346.$$

Определение коэффициента использования тепла топлива является заключительным этапом расчета технико-экономических параметров ТЭЦ. Переходим к расчету параметров КЭС и районной котельной. При обозначении расходов пара и топлива при раздельном производстве электричества и тепла, используем нижний индекс «P» (что означает «раздельно»).

Долю отбора пара на регенерацию α определяем согласно (3.5):

$$\alpha = \frac{i'_4 - i'_6}{i_4 - i'_6} = \frac{608,5 - 121,42}{2716,37 - 121,42} = 0,1877.$$

Внутреннюю работу 1 кг пара с учетом потерь на трение определяем согласно (3.6):

$$h_{ip} = (i_1 - i_4) + (i_4 - i_6)(1 - \alpha) = (3262,77 - 2716,37) + (2716,37 - 2454,42)(1 - 0,1877) = 759,18 \text{ кДж/кг.}$$

Удельный расход пара для выработки электроэнергии при номинальном режиме $d_{\text{ЭР}}^H$, определяем согласно (3.7):

$$d_{\text{ЭР}}^H = \frac{1}{h_{ip} \eta_M \eta_{\text{ЭЛ}}} = \frac{1}{759,19 \cdot 0,83 \cdot 0,91} = 0,001744 \text{ кДж/кг.}$$

Полный расход пара $D_{\text{БР}}^H$, определяем по (3.8):

$$D_{\text{БР}}^H = d_{\text{ЭР}}^H N_H = 0,001744 \cdot 12730 = 22,2 \text{ кг/с.}$$

Расход условного топлива на выработку электроэнергии $B_{\text{ЭР}}^H$ определяем согласно (3.10):

$$B_{\text{ЭР}}^H = \frac{D_{\text{БР}}^H (i_1 - i'_4)}{Q_H^P \eta_{\text{нз}}} = \frac{22,2(3262,77 - 608,5)}{29300 \cdot 0,91} = 2,21 \text{ кг/с.}$$

Удельный расход топлива на выработку электроэнергии определяем по формуле (3.11):

$$e_{\text{ЭР}}^H = \frac{B_{\text{ЭР}}^H}{N_H} = \frac{2,21}{12730} = 173,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг/кДж.}$$

Расход условного топлива на выработку пара в котельной определяем согласно (3.12):

$$B_{\text{ТР}}^H = \frac{Q_T^H}{Q_H^P \eta_{\text{нз}}} = \frac{9998,34}{29300 \cdot 0,91} = 0,375 \text{ кг/с.}$$

Электрический коэффициент полезного действия КЭС определяем согласно (3.13):

$$\eta_{\text{КЭС}}^{\text{Э}} = \frac{1}{e_{\text{ЭР}}^H Q_H^P} = \frac{1}{173,6 \cdot 10^{-6} \cdot 29300} = 0,1966.$$

Общий расход топлива определяется по формуле (3.14):

$$B_P^H = B_{\text{ЭР}}^H + B_{\text{ТР}}^H = 2,21 + 0,375 = 2,585 \text{ кг/с.}$$

Коэффициент использования тепла топлива при раздельном производстве энергии определим согласно (2.30):

$$k = \frac{N_H + Q_T^H}{B_P^H Q_H^P} = \frac{12730 + 9998,34}{2,585 \cdot 29300} = 0,3.$$

Экономия топлива в комбинированной установке по сравнению с раздельной установкой определяется согласно (3.15)

$$a = \frac{B_P^H - B^H}{B_P^H} 100\% = \frac{2,585 - 2,318}{2,585} 100\% = 10,33\%.$$

Этот результат позволяет сделать вывод о том, что комбинированная выработка тепла и электроэнергии на ТЭЦ выгоднее, чем раздельное производство на КЭС и в районной котельной. В условиях рассмотренного варианта экономия топлива достигает 10,33%. Сравнение электрических КПД ТЭЦ и КЭС показывает:

$$\eta_{ТЭЦ}^э > \eta_{КЭС}^э \quad (0,2236 > 0,1966).$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кушнырев В.И. Техническая термодинамика и теплопередача: учеб. / В.И. Кушнырев, В.И. Лебедев, В.А. Павленко. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
2. Кириллин В.А. Техническая термодинамика: учеб. / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Энергия, 1974. – 412 с.
3. Бальян С.В. Техническая термодинамика и тепловые двигатели: учеб. / С.В. Бальян. - Л.: Машиностроение, 1973. - 304 с.
4. Курносов А.Т. Техническая термодинамика: учеб. пособие / А.Т. Курносов, Д.Н. Китаев.; Воронеж. гос. арх.-строит. ун-т. - Воронеж, 2007. – 110 с.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Студент по двум последним цифрам номера зачетной книжки выбирает из табл. П.1 исходные данные для выполнения курсовой работы.

Таблица П.1

Предпоследняя цифра	N_H , МВт	P_1 , МПа	t_1 , °C	$\eta_k = \eta_{nc}$	η_{oi}'/η_{oi}''
9	11,25	7,980	400	0,83	0,78/0,82
8	12,44	8,971	450	0,81	0,73/0,77
7	15,20	7,865	500	0,89	0,83/0,87
6	14,24	8,835	400	0,93	0,91/0,94
5	13,80	6,980	425	0,9	0,93/0,96
4	12,59	8,930	425	0,88	0,9/0,92
3	15,52	8,555	500	0,87	0,7/0,73
2	14,28	7,900	450	0,79	0,78/0,83
1	11,82	7,884	475	0,8	0,87/0,89
0	13,50	6,950	475	0,8	0,78/0,82
Последняя цифра	$P_{отб}$, кПа	$P_K = P_2$, кПа	$D_{отб}^H$, кг/с	η_M	$\eta_{эл}$
9	390	3,0	5,0	0,82	0,89
8	410	3,25	5,5	0,8	0,85
7	430	3,5	16,0	0,87	0,91
6	450	3,75	7,0	0,96	0,99
5	500	4,0	6,5	0,9	0,97
4	600	4,25	8,0	0,95	0,98
3	700	4,5	10,5	0,83	0,9
2	800	4,75	9,5	0,88	0,92
1	900	5	16,6	0,85	0,95
0	1000	5,5	6,0	0,89	0,96

Приложение 2

СВОЙСТВА СУХОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА (ПО ТЕМПЕРАТУРАМ)

Таблица П.2

t, °C	p, МПа	ν' , м ³ /кг	ν'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r, кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
0,01	0,0006108	0,0010002	206,3	0,004847	0	2501	2501	0	9,1544
5	0,0008719	0,0010001	147,2	0,006793	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	0,0012277	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	0,0017041	0,0010010	77,97	0,01282	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	0,003166	0,0010030	43,40	0,02304	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	0,03037	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	0,005622	0,0010061	25,24	0,03962	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	0,007375	0,0010079	19,55	0,05115	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	0,009584	0,0010099	15,28	0,06544	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,04	0,08306	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
55	0,015740	0,0010145	9,578	0,1044	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901
60	0,019917	0,0010171	7,678	0,1302	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084
65	0,02501	0,0010199	6,201	0,1613	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	0,03117	0,0010228	5,045	0,1982	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	0,03855	0,0010258	4,133	0,2420	314,0	2635	2321	1,0157	7,6815
80	0,04736	0,0010290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	0,05781	0,0010324	2,828	0,3536	355,9	2651	2295	1,1342	7,5438
90	0,07011	0,0010359	2,361	0,4235	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	0,08451	0,0010396	1,982	0,5045	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
105	0,12079	0,0010474	1,419	0,7047	440,2	2683	2243	1,3632	7,2959
110	0,14326	0,0010515	1,210	0,8264	461,3	2691	2230	1,4184	7,2387
115	0,16905	0,0010559	1,036	0,9652	482,5	2698	2216	1,4733	7,1832
120	0,19854	0,0010603	0,8917	1,121	503,7	2706	2202	1,5277	7,1298
125	0,23208	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777
130	0,27011	0,0010697	0,6683	1,496	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272
135	0,3130	0,0010747	0,5820	1,718	567,5	2727	2159	1,6869	6,9781
140	0,3614	0,0010798	0,5087	1,966	589,0	2734	2145	1,7392	6,9304
145	0,4155	0,0010851	0,4461	2,242	610,5	2740	2130	1,7907	6,8839
150	0,4760	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746	2114	1,8418	6,8383
155	0,5433	0,0010962	0,3466	2,885	653,9	2753	2099	1,8924	6,7940
160	0,6180	0,0011021	0,3068	3,258	675,5	2758	2082	1,9427	6,7508
165	0,7008	0,0011081	0,2725	3,670	697,3	2763	2066	1,9924	6,7081
170	0,7920	0,0011144	0,2426	4,122	719,2	2769	2050	2,0417	6,6666
175	0,8925	0,0011208	0,2166	4,617	741,1	2773	2032	2,0909	6,6256

Окончание прил. 2
Окончание табл. П.2

t, °C	p, МПа	ν' , м ³ /кг	ν'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	г, кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
180	1,0027	0,0011275	0,1939	5,157	763,1	2778	2015	2,1395	6,5858
185	1,1234	0,0011344	0,1739	5,750	785,2	2782	1997	2,1876	6,5465
190	1,2553	0,0011415	0,1564	6,394	807,5	2786	1979	2,2357	6,5074
195	1,3989	0,0011489	0,1409	7,097	829,9	2790	1960	2,2834	6,4694
200	1,5551	0,0011565	0,1272	7,862	852,4	2793	1941	2,3308	6,4318
205	1,7245	0,0011644	0,1151	8,688	875,0	2796	1921	2,3777	6,3945
210	1,9080	0,0011726	0,1043	9,588	897,7	2798	1900	2,4246	6,3577
215	2,1062	0,0011812	0,09465	10,56	920,7	2800	1879	2,4715	6,3212
220	2,3201	0,0011900	0,08606	11,62	943,7	2802	1858	2,5179	6,2849
225	2,5504	0,0011992	0,07837	12,76	966,9	2802	1835	2,5640	6,2488
230	2,7979	0,0012087	0,07147	13,99	990,4	2803	1813	2,6101	6,2133
235	3,0635	0,0012187	0,06527	15,32	1013,9	2804	1790	2,6561	6,1780
240	3,3480	0,0012291	0,05967	16,76	1037,5	2803	1766	2,7021	6,1425
245	3,6524	0,0012399	0,05462	18,30	1061,6	2803	1741	2,7478	6,1073
250	3,9776	0,0012512	0,05006	19,98	1085,7	2801	1715	2,7934	6,0721
255	4,325	0,0012631	0,04591	21,78	1110,2	2799	1689	2,8394	6,0366
260	4,694	0,0012755	0,04215	23,72	1135,1	2796	1661	2,8851	6,0013
265	5,087	0,0012886	0,03872	25,83	1160,2	2794	1634	2,9307	5,9667
270	5,505	0,0013023	0,03560	28,09	1185,3	2790	1605	2,9764	5,9297
275	5,949	0,0013168	0,03274	30,53	1210,7	2785	1574,2	3,0223	5,8938
280	6,491	0,0013321	0,03013	33,19	1236,9	2780	1542,9	3,0681	5,8573
285	6,918	0,0013483	0,02774	36,05	1263,1	2773	1510,2	3,1146	5,8205
290	7,445	0,0013655	0,02554	39,15	1290,0	2766	1476,3	3,1611	5,7827
295	8,002	0,0013839	0,02351	42,53	1317,2	2758	1441,0	3,2079	5,7443
300	8,592	0,0014036	0,02164	46,22	1344,9	2749	1404,2	3,2548	5,7049
305	9,214	0,001425	0,01992	50,20	1373,1	2739	1365,6	3,3026	5,6647
310	9,870	0,001447	0,01832	54,58	1402,1	2727	1325,2	3,3508	5,6233
315	10,561	0,001472	0,01683	59,42	1431,7	2714	1282,3	3,3996	5,5802
320	11,290	0,001499	0,01545	64,72	1462,1	2700	1237,8	3,4495	5,5353
325	12,057	0,00529	0,01417	70,57	1493,6	2684	1190,3	3,5002	5,4891
330	12865	0,001562	0,01297	77,10	1526,1	2666	1139,6	3,5522	5,4412
335	13,714	0,001599	0,01184	84,46	1559,8	2646	1085,7	3,6056	5,3905
340	14,608	0,001639	0,01078	92,76	1594,7	2622	1027,0	3,6065	5,3361
345	15,548	0,001686	0,009771	102,34	1639	2595	963,5	3,7184	5,2769
350	16,537	0,001741	0,008803	113,6	1671	2565	893,5	3,7786	5,2117
355	17,577	0,001807	0,007869	127,1	1714	2527	813,0	3,8439	5,1385
360	18,674	0,001894	0,006943	144,0	1762	2481	719,3	3,9162	5,0530
365	19,830	0,00202	0,00599	166,8	1817	2421	603,5	4,0009	4,9463
370	21,053	0,00222	0,00493	203	1893	2331	438,4	4,1137	4,7951
374	22,522	0,00280	0,00347	288	485,3	512,7	27,4	1,0332	1,0755

Приложение 3

СВОЙСТВА СУХОГО НАСЫЩЕННОГО ПАРА (ПО ДАВЛЕНИЯМ)

Таблица П.3

p, МПа	t, °C	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r, кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
0,0010	6,92	0,0010001	129,9	0,00770	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,0015	13,038	0,0010007	87,90	0,001138	54,75	2525	2470	0,1958	8,827
0,0020	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,0025	21,094	0,0010021	54,24	0,01843	88,50	2539	2451	0,3124	8,642
0,0030	24,097	0,0010028	45,66	0,02190	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,0035	26,692	0,0010035	39,48	0,02533	111,86	2550	2438	0,3908	8,521
0,0040	28,979	0,0010041	34,81	0,02873	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,0045	31,033	0,0010047	31,13	0,03211	130,00	2557	2427	0,4507	8,431
0,0050	32,83	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,0060	36,18	0,0010064	23,74	0,04212	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,0070	39,03	0,0010075	20,53	0,04871	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,0080	41,54	0,0010085	18,10	0,05525	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,0090	43,79	0,0010094	16,20	0,06172	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,010	45,84	0,0010103	14,68	0,06812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,011	47,72	0,0010111	13,40	0,07462	199,7	2588	2388	0,6740	8,116
0,012	49,45	0,0010119	12,35	0,08097	207,0	2591	2384	0,6966	8,085
0,013	51,07	0,0010126	11,46	0,08762	213,8	2594	2380	0,7174	8,057
0,014	52,58	0,0010133	10,69	0,09354	220,1	2596	2376	0,7368	8,031
0,015	54,00	0,0010140	10,02	0,09980	226,1	2599	2373	0,7550	8,007
0,020	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,025	64,99	0,0010199	6,202	0,1612	272,0	2618	2346	0,8934	7,830
0,030	69,12	0,0010222	5,226	0,1913	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,040	75,88	0,0010264	3,994	0,2504	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,050	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2204	1,0910	7,593
0,060	85,95	0,0010330	2,732	0,3661	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,070	89,97	0,0010359	2,364	0,4230	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,080	93,52	0,0010385	2,087	0,4792	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,090	96,72	0,0010409	1,869	0,5350	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
0,100	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
0,11	102,32	0,0010452	1,550	0,6453	428,9	2679	2250	1,3327	7,328
0,12	104,81	0,0010472	1,429	0,6999	439,4	2683	2244	1,3606	7,298
0,13	107,14	0,0010492	1,325	0,7545	449,2	2687	2238	1,3866	7,271
0,14	109,33	0,0010510	1,236	0,8088	458,5	2690	2232	1,4109	7,246
0,15	111,38	0,0010527	1,159	0,8627	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
0,16	113,17	0,0010543	1,091	0,9164	475,4	2696	2221	1,4550	7,202
0,17	115,17	0,0010559	1,031	0,9699	483,2	2699	2216	1,4752	7,182
0,18	116,94	0,0010575	0,9773	1,023	490,7	2702	2211	1,4943	7,163
0,19	118,62	0,0010591	0,9290	1,076	497,9	2704	2206	1,5126	7,145
0,20	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127

Продолжение прил. 3
Продолжение табл. П.3

p, МПа	t, °C	ν' , м ³ / кг	ν'' , м ³ / кг	ρ'' , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r, кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
0,21	121,78	0,0010619	0,8459	1,182	511,4	2709	2198	1,5470	7,111
0,22	123,27	0,0010633	0,8098	1,235	517,8	2711	2193	1,5630	7,096
0,23	124,71	0,0010646	0,7768	1,287	524,0	2713	2189	1,5783	7,081
0,24	126,09	0,0010659	0,7465	1,340	529,8	2715	2185	1,5929	7,067
0,25	127,43	0,0010672	0,7185	1,392	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
0,26	128,73	0,0010685	0,6925	1,444	540,9	2719	2178	1,621	7,040
0,27	129,98	0,0010697	0,6684	1,496	546,2	2721	2175	1,634	7,027
0,28	131,20	0,0010709	0,6461	1,548	551,4	2722	2171	1,647	7,015
0,29	132,39	0,0010721	0,6253	1,599	556,5	2724	2167	1,660	7,003
0,30	133,53	0,0010733	0,6057	1,651	561,4	2725	2164	1,672	6,992
0,31	134,66	0,0010744	0,5873	1,703	566,3	2727	2161	1,683	6,981
0,32	135,75	0,0010754	0,5701	1,754	571,1	2728	2157	1,695	6,971
0,33	136,82	0,0010765	0,5539	1,805	575,7	2730	2154	1,706	6,961
0,34	137,86	0,0010776	0,5386	1,857	580,2	2731	2151	1,717	6,951
0,35	138,88	0,0010786	0,5241	1,908	584,5	2732	2148	1,728	6,941
0,36	139,87	0,0010797	0,5104	1,959	588,7	2734	2145	1,738	6,932
0,37	140,84	0,0010807	0,4975	1,010	592,8	2735	2142	1,748	6,923
0,38	141,79	0,0010817	0,4852	2,061	596,8	2736	2139	1, 758	6,914
0,39	142,71	0,0010827	0,4735	2,112	600,8	2737	2136	1,768	6,905
0,40	143,62	0,0010836	0,4624	2,163	604,7	2738	2133	1,777	6,897
0,41	144,51	0,0010845	0,4518	2,213	608,5	2740	2131	1,786	6,889
0,42	145,39	0,0010855	0,4416	2,264	612,3	2741	2129	1,795	6,881
0,43	146,25	0,0010865	0,4319	2,315	616,1	2742	2126	1,804	6,873
0,44	147,09	0,0010874	0,4227	2,366	619,8	2743	2123	1,812	6,865
0,45	147,92	0,0010883	0,4139	2,416	623,4	2744	2121	1,821	6,857
0,50	151,84	0,0010927	0,3747	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,60	158,84	0,0011007	0,3156	3,169	670,5	2757	2086	1,931	6,761
0,70	164,96	0,0011081	0,2728	3,666	697,2	2764	2067	1,992	6,709
0,80	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
0,9	175,35	0,0011213	0,2149	4,654	742,8	2774	2031	2,094	6,623
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
1,1	184,05	0,0011331	0,1775	5,634	781,1	2781	2000	2,179	6,554
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,523
1,3	191,60	0,0011438	0,1512	6,614	814,5	2787	1973	2,251	6,495
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	7,103	830,0	2790	1960	2,284	6,469
1,5	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
1,6	201,36	0,0011586	0,1238	8,080	858,3	2793	1935	2,344	6,422
1,7	204,30	0,0011632	0,1167	8,569	871,6	2795	1923	2,371	6,400
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	9,058	884,4	2796	1912	2,397	6,379

Окончание прил. 3
Окончание табл. П.3

p, МПа	t, °C	ν' , м ³ /кг	ν'' , м ³ /кг	ρ'' , кг/м ³	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r, кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
1,9	209,78	0,0011722	0,1047	9,549	896,6	2798	1901	2,422	6,359
2,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
2,1	214,84	0,0011809	0,09492	10,54	919,8	2800	1880	2,470	6,322
2,2	217,24	0,0011851	0,09068	11,03	930,9	2801	1870	2,492	6,305
2,3	219,55	0,0011892	0,08679	11,52	941,5	2801	1860	2,514	6,288
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	12,01	951,8	2802	1850	2,534	6,272
2,5	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	13,01	971,7	2803	1831	2,573	6,242
2,7	228,06	0,0012050	0,07406	13,50	981,3	2803	1822	2,592	6,227
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	14,00	990,4	2803	1813	2,611	6,213
2,9	231,96	0,0012126	0,06895	14,50	999,4	2803	1804	2,628	6,199
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,00	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
3,2	237,44	0,0012239	0,06246	16,01	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
3,4	240,88	0,0012310	0,05875	17,02	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
3,6	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,3	2802	1745	2,740	6,113
3,8	247,31	0,0012450	0,05246	19,06	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
4,2	253,24	0,0012588	0,04732	21,13	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
4,4	256,05	0,0012656	0,04508	22,18	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
4,6	258,75	0,0012724	0,04305	23,23	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
4,8	261,37	0,0012790	0,04118	24,29	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	25,35	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
5,5	269,94	0,0013021	0,03564	28,06	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	30,84	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
6,5	280,83	0,0013347	0,02973	33,64	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	36,54	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
7,5	290,50	0,0013673	0,02532	39,49	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	42,52	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
8,5	299,24	0,0014005	0,02192	45,62	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	48,83	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
9,5	307,22	0,0014345	0,01919	52,11	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
10,0	310,96	0,0014521	0,01803	55,46	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
11,0	318,04	0,001489	0,01598	62,58	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
12,0	324,63	0,001527	0,01426	70,13	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
13,0	330,81	0,001567	0,01277	78,30	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
14,0	336,63	0,001611	0,01149	87,03	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
15,0	342,11	0,001658	0,01035	96,62	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
16,0	347,32	0,001710	0,009318	107,3	1650	2582	932,0	3,746	5,247
17,0	352,26	0,001768	0,008382	119,3	1690	2548	858,3	3,807	5,177
18,0	356,96	0,001837	0,007504	133,2	1732	2510	778,2	3,871	5,107
19,0	361,44	0,001921	0,00668	149,7	1776	2466	690	3,938	5,027
20,0	365,71	0,00204	0,00585	170,9	1827	2410	583	4,015	4,928
21,0	369,79	0,00221	0,00498	200,7	1888	2336	448	4,108	4,803
22,0	373,7	0,00273	0,00367	272,5	2016	2168	152	4,303	4,591

Приложение 4

СВОЙСТВА ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА (220-600 °С)

Таблица П.4

p, МПа	t, °С	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
0,004	v	56,93	59,24	61,56	63,87	66,18	71,96	77,73	85,31	89,28	100,84
	i	2918	2958	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,402	9,479	9,554	9,627	9,698	9,866	10,024	10,174	10,317	10,585
0,008	v	28,44	29,60	30,75	31,90	33,06	35,94	38,84	41,72	44,61	50,38
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	9,081	9,159	9,234	9,306	9,377	9,546	9,704	9,854	9,997	10,265
0,010	v	22,76	23,68	24,60	25,53	26,46	28,76	31,08	33,39	35,70	40,32
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,978	9,056	9,131	9,203	9,274	9,443	9,601	9,751	9,895	10,162
0,012	v	18,96	19,73	20,50	21,27	22,04	23,96	25,89	27,82	29,74	33,60
	i	2918	2957	2997	3036	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,894	8,972	9,047	9,119	9,190	9,359	9,517	9,667	9,810	10,078
0,014	v	16,24	16,90	17,56	18,22	18,88	20,53	22,18	23,83	25,49	28,79
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,823	8,900	8,975	9,048	9,119	9,288	9,446	9,596	9,739	10,007
0,016	v	14,213	14,790	15,367	15,943	16,52	17,96	19,41	20,85	22,29	25,18
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,761	8,838	8,913	8,986	9,057	9,226	9,384	9,534	9,678	9,945
0,020	v	11,369	11,832	12,295	12,758	13,220	14,376	15,530	16,68	17,82	20,15
	i	2918	2957	2997	3037	3077	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,657	8,735	8,810	8,883	8,954	9,123	9,281	9,431	9,575	9,842
0,030	v	7,573	7,882	8,191	8,500	8,809	9,580	10,351	11,121	11,891	13,430
	i	2917	2956	2996	3036	3076	3177	3280	3384	3490	3707
	s	8,469	8,547	8,622	8,695	8,766	8,935	9,093	9,244	9,388	9,655
0,10	v	2,266	2,359	2,452	2,545	2,638	2,871	3,102	3,334	3,565	4,028
	i	2914	2954	2993	3033	3074	3175	3278	3382	3488	3706
	s	7,910	7,988	8,064	8,139	8,211	8,381	8,541	8,690	8,833	9,097
0,12	v	1,886	1,964	2,042	2,120	2,197	2,391	2,584	2,777	2,970	3,357
	i	2913	2953	2993	3033	3073	3174	3278	3382	3488	3705
	s	7,824	7,903	7,979	8,053	8,126	8,296	8,456	8,606	8,749	9,013
0,60	v	0,3688	0,3855	0,4019	0,4181	0,4342	0,4741	0,5136	0,5528	0,5919	0,6697
	i	2891	2933	2975	3017	3059	3164	3270	3376	3483	3701
	s	7,051	7,135	7,215	7,292	7,366	7,541	7,704	7,857	8,001	8,266
0,80	v	0,2739	0,2867	0,2993	0,3118	0,3240	0,3542	0,3842	0,4137	0,4432	0,5018
	i	2883	2926	2969	3011	3054	3160	3267	3373	3481	3699
	s	6,905	6,991	7,073	7,151	7,226	7,404	7,568	7,722	7,866	8,132
1,0	v	0,2169	0,2274	0,2377	0,2478	0,2578	0,2822	0,3065	0,3303	0,3539	0,4010
	i	2874	2918	2962	3005	3048	3156	3263	3370	3479	3698
	s	6,788	6,877	6,961	7,040	7,116	7,296	7,461	7,615	7,761	8,027
1,2	v	0,1788	0,1879	0,1967	0,2054	0,2139	0,2343	0,2547	0,2747	0,2944	0,3339
	i	2865	2911	2955	2999	3042	3151	3260	3368	3477	3696
	s	6,688	6,780	6,866	6,947	7,025	7,026	7,373	7,529	7,674	7,942

Окончание прил. 4
Окончание табл. П.4

p, МПа	t, °C	220	240	260	280	300	350	400	450	500	600
1,4	v	0,1515	0,1596	0,1673	0,1748	0,1823	0,2001	0,2176	0,2349	0,2520	0,2858
	i	2855	2902	2948	2992	3036	3147	3256	3365	3474	3695
	s	6,602	6,697	6,784	6,867	6,945	7,130	7,299	7,455	7,601	7,870
1,6	v	0,1309	0,1382	0,1452	0,1519	0,1585	0,1743	0,1899	0,2051	0,2201	0,2499
	i	2844	2893	2940	2986	3030	3142	3253	3363	3472	3693
	s	6,524	6,622	6,711	6,796	6,877	7,063	7,233	7,390	7,537	7,806
1,8	v	0,1149	0,1216	0,1280	0,1341	0,1401	0,1545	0,1683	0,1819	0,1953	0,2219
	i	2833	2884	2932	2979	3025	3138	3249	3360	3470	3691
	s	6,452	6,554	6,646	6,732	6,814	7,003	7,175	7,333	7,480	7,750
2,0	v	0,1021	0,1084	0,1143	0,1200	0,1255	0,1384	0,1511	0,1634	0,1755	0,1995
	i	2821	2875	2924	2972	3019	3134	3246	3357	3468	3690
	s	6,358	6,491	6,585	6,674	6,757	7,049	7,122	7,282	7,429	7,701
3	v	0,0011891	0,06826	0,07294	0,07720	0,08119	0,09051	0,09929	0,1078	0,1161	0,1325
	i	943,5	2823	2882	2937	2988	3111	3229	3343	3456	3682
	s	2,514	6,225	6,337	6,438	6,530	6,735	6,916	7,080	7,231	7,506
8	v	0,0011833	0,0012221	0,0012689	0,0013275	0,02429	0,03003	0,03438	0,03821	0,04177	0,04844
	i	945,1	1037,9	1134,4	1235,4	2784	2985	3135	3270	3397	3640
	s	2,504	2,688	2,873	3,059	5,788	6,126	6,358	6,552	6,722	7,019
9	v	0,0011822	0,0012207	0,0012669	0,0013246	0,0014016	0,02586	0,03001	0,03354	0,03680	0,04285
	i	945,2	1038,1	1134,2	1234,9	1344,3	2954	3114	3254	3386	3631
	s	2,502	2,686	2,870	3,056	3,249	6,033	6,280	6,481	6,656	6,957
10	v	0,0011805	0,0012185	0,0012650	0,0013217	0,0013970	0,02247	0,02646	0,02979	0,03281	0,03837
	i	945,8	1038,3	1134,1	1234,5	1342,2	2920	3093	3293	3372	3621
	s	2,500	2,684	2,868	3,053	3,244	5,940	6,207	6,416	6,596	6,901
12	v	0,0011788	0,0012164	0,0012612	0,0013164	0,0013886	0,01726	0,02113	0,02414	0,02681	0,03163
	i	946,6	1038,7	1133,9	1233,7	1340,0	2844	3049	3206	3347	3603
	s	2,497	2,680	2,863	3,046	3,235	5,755	6,071	6,298	6,487	6,803
13	v	0,0011777	0,0012150	0,0012593	0,0013137	0,0013847	0,01514	0,01905	0,02197	0,02450	0,02903
	i	946,9	1038,9	1133,8	1233,3	1339,0	2799	3026	3189	3334	3594
	s	2,495	2,678	2,860	3,043	3,230	5,657	6,006	6,243	6,438	6,758
14	v	0,0011766	0,0012136	0,0012575	0,0013111	0,0013808	0,01325	0,01726	0,02010	0,02252	0,02683
	i	947,3	1039,1	1133,8	1133,8	1232,9	1338,0	2750	3000	3172	3585
	s	2,493	2,676	2,858	3,040	3,226	5,55	5,942	6,190	6,390	6,716
16	v	0,0011744	0,0012109	0,0012539	0,0013061	0,0013735	0,00978	0,01429	0,01704	0,01930	0,02322
	i	948,0	1039,5	1133,7	1232,2	1336,2	2612	2945	3173	3294	3567
	s	2,489	2,672	2,853	3,035	3,218	5,302	5,816	6,090	6,303	6,640
24	v	0,0011658	0,0012004	0,0012404	0,0012883	0,0013457	0,001612	0,00676	0,00977	0,01174	0,01478
	i	950,9	1041,3	1134,0	1230,3	1331,2	1625	2638	2971	3174	3493
	s	2,477	2,657	2,835	3,011	3,190	3,684	5,236	5,723	5,999	6,394
30	v	0,0011597	0,0011931	0,0012313	0,0012764	0,0013311	0,001556	0,00283	0,00672	0,00869	0,01144
	i	953,3	1042,9	1134,7	1229,7	1229,0	1329,0	1608	2455	2816	3073
	s	2,468	2,647	2,822	2,996	3,171	3,640	4,476	5,446	5,799	6,242

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Общие положения.....	4
2. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии на ТЭЦ.....	5
2.1. Характеристика основного оборудования ТЭЦ.....	5
2.2. Схема производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ с турбинами с регулируемыми отборами.....	8
2.3. Термодинамический расчет комбинированной схемы производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ.....	10
2.3.1 Построение i - S - диаграммы.....	10
2.3.2 Построение T - S - диаграммы.....	12
2.4. Определение термодинамических и технико-экономических параметров.....	14
2.4.1 Конденсационный режим работы турбины.....	14
2.4.2 Работа турбины с отбором.....	15
3. Раздельная схема производства тепловой и электрической энергии на КЭС и в районных котельных.....	17
3.1. Построение процессов водяного пара в конденсационной турбине.....	17
3.2. Определение термодинамических и технико-экономических параметров КЭС и районных котельных.....	19
3.3. Анализ показателей эффективности ТЭЦ и КЭС.....	21
4. Пример выполнения курсовой работы.....	21
Библиографический список.....	30
Приложение 1. Задания для выполнения курсовой работы.....	31
Приложение 2. Свойства сухого насыщенного пара (по температурам).....	32
Приложение 3. Свойства сухого насыщенного пара (по давлениям).....	34
Приложение 4. Свойства перегретого водяного пара (200-600 °С).....	37

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА
ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
НА ТЭЦ, КЭС И В РАЙОННЫХ КОТЕЛЬНЫХ**

*Методические указания
к выполнению практических занятий и курсового проекта (работ)
для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство»,
21.03.01 «Нефтегазовое дело», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
всех форм обучения*

Составители: Китаев Дмитрий Николаевич,
Мартыненко Галина Николаевна

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 02.06.2021.
Формат 60х84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.
Уч.-изд. л. 2,5. Усл. печ. л. 2,3. Тираж 306 экз.
Заказ № 87.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский просп., 14