

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»

**В. В. Селин, Е. А. Беркова**

## **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Учебно-методическое пособие по курсовой работе  
для студентов бакалавриата по направлению подготовки  
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»  
(профиль «Тепловые электрические станции»)

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО "КГТУ"  
2020

УДК 621.1.016

Рецензент

доцент кафедры «Судовые энергетические установки и теплоэнергетика»  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
С.В. Юрков

**Селин, В.В.** Техническая термодинамика: учебно-методическое пособие по курсовой работе для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Тепловые электрические станции»)/ **В.В. Селин, Е.А. Беркова.** – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2020. – 33 с.

Учебно-методическое пособие подготовлено в соответствии с учебным планом и рабочей программой дисциплины «Техническая термодинамика», и предназначено для подготовки бакалавров направления подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Тепловые электрические станции»).

В учебно-методическом пособии изложены общие положения по курсовой работе, приведены варианты задания и методика выполнения работы, даны указания по структуре, содержанию, правилам оформления пояснительной записки и графической части.

Рис. – 7, табл. – 5, список литературы – 6 наименований.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Судовые энергетические установки и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» 13.02.2020 г., протокол № 04.

Учебно-методическое пособие рекомендовано к изданию на заседании методической комиссией факультета судостроения и энергетики ФГБОУ ВПО «Калининградский государственный технический университет» 17.02.2020 г., протокол № 06.

УДК 621.1.016

© Федеральное государственное  
Бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2020 г.  
© Селин В.В., Беркова Е.А., 2020 г.

## Содержание

Введение .....	4
1 Общие положения.....	4
2 Структура и содержание курсовой работы.....	5
3 Правила оформления курсовой работы.....	8
4 Защита курсовой работы.....	9
5 Варианты задания к курсовой работе.....	10
6 Методика выполнения курсовой работы.....	11
6.1 Термодинамический анализ обратимого цикла Ренкина.....	11
6.2 Анализ необратимого цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия .....	13
6.3 Анализ необратимого цикла Ренкина с помощью эксергетического метода .....	17
7 Сопоставление результатов анализа действительного цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия с результатами анализа по эксергетическому методу .....	22
Список рекомендуемой литературы .....	24
Приложение А .....	25
Приложение Б.....	26

## Введение

Выполнение курсовой работы по дисциплине «Техническая термодинамика» для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Тепловые электрические станции») является важным и неотъемлемым этапом обучения.

Цель работы – формирование умений и навыков термодинамического анализа циклов паросиловых установок, являющихся основными для тепловых электрических станций.

Работа предполагает расчет теоретического и действительного цикла паросиловой установки (цикла Ренкина), термодинамический анализ действительного цикла методом коэффициентов полезного действия и эксергетическим методом, сопоставление результатов анализа, полученных разными методами, составление простейшей тепловой схемы электростанции и изучение принципа действия основных элементов этой схемы: парового котла, паровой турбины, конденсатора, насоса.

Курсовая работа выполняется студентом самостоятельно в соответствии с предложенным ему заданием в течение учебного семестра, т.е. до завершения курса лекций и лабораторного практикума.

Все расчеты проводятся с использованием  $h-s$  диаграммы для водяного пара и таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [1,2].

Выполненная работа защищается студентом на собеседовании у преподавателя.

Учебно-методическое пособие включает в себя задание к курсовой работе, методику ее выполнения, требования к содержанию пояснительной записки и графической части работы, правила оформления, список рекомендуемой литературы.

## 1 Общие положения

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся в бакалавриате по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (профиль «Тепловые электрические станции»). Пособие составлено в соответствии с рабочей программой дисциплины «Техническая термодинамика».

Дисциплина «Техническая термодинамика» является дисциплиной обязательной части реализуемой образовательной программы высшего образования и изучается студентами очной и заочной форм обучения в третьем и четвертом семестрах. В результате освоения дисциплины у студентов формируются способности: применять положения законов термодинамики при расчетах, проектировании и эксплуатации теплоэнергетического оборудования тепловых электростанций; проводить термодинамические расчеты при проектировании технологического оборудования тепловых и атомных электростанций и систем теплоснабжения; анализировать полученные в результате оценки эффективно-

сти работы электростанции и ее оборудования результаты и предлагать способы по повышению экономичности и надежности выработки тепловой и электрической энергии.

Выполнение курсовой работы «Термодинамический анализ цикла паросиловой установки эксергетическим методом» позволяет студентам углубить и закрепить полученные в процессе изучения дисциплины знания в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок. Кроме того, студенты приобретают навыки самостоятельной работы со справочными и нормативными документами, учебной и учебно-методической литературой, ресурсами интернета, различными программными средствами.

Учебно-методическое пособие устанавливает общие требования к содержанию и оформлению курсовой работы, включает в себя методики термодинамического анализа теоретического цикла Ренкина и термодинамического анализа действительного цикла паросиловой установки (ПСУ) методом коэффициентов полезного действия и эксергетическим методом, сопоставление результатов анализа необратимого цикла разными методами, пример расчетов и образцы графического материала.

Пособие обязательно для ознакомления перед началом выполнения курсовой работы.

## **2 Структура и содержание курсовой работы**

Курсовая работа включает в себя теоретическую, расчетную и графическую части и имеет следующую структуру:

- титульный лист;
- содержание;
- описание принципиальной тепловой схемы электростанции, принципа действия её основных элементов: котла, турбины, конденсатора, насоса;
- термодинамический анализа обратимого цикла Ренкина;
- анализ необратимого цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия;
- анализ необратимого цикла Ренкина с помощью эксергетического метода;
- сопоставление результатов анализа действительного цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия с результатами анализа по эксергетическому методу;
- список использованной литературы;
- приложения.

Титульный лист является первым листом курсовой работы. Он оформляется в соответствии с существующими в университете нормами и должен содержать следующие сведения:

- полное наименование вуза;
- наименование кафедры;
- вид работы – «курсовая работа»;

- название учебной дисциплины – «Техническая термодинамика»;
- тему курсовой работы – «Термодинамический анализ цикла паросило-вой установки эксергетическим методом»;
- шифр учебной группы;
- фамилию и инициалы студента;
- ученую степень, научное звание, инициалы и фамилию преподавателя;
- место и год выполнения работы.

Образец оформления титульного листа представлен в Приложении А.

После титульного листа приводится «Содержание», где последовательно перечисляются заголовки разделов и подразделов и указываются номера страниц, с которых они начинаются. Все разделы и подразделы, кроме введения, заключения, списка использованной литературы и приложения, должны быть пронумерованы.

При описании принципиальной тепловой схемы электростанции, принципа действия и назначения её основных элементов (котла, турбины, конденсатора, насоса) можно воспользоваться имеющимися в литературе [3-6] сведениями. На рисунке 1 Приложения Б в настоящем учебно-методическом пособии показана тепловая схема простейшей паросиловой установки, которую можно взять за основу.

Далее в курсовой работе студент должен самостоятельно в соответствии с предложенным ему заданием (см. табл. 1) выполнить расчеты теоретического и действительного циклов паросиловой установки и проанализировать полученные результаты. Все расчеты в пояснительной записке должны быть представлены в табличной форме, как это сделано в примерах в таблицах 2-4.

В разделе «Термодинамический анализа обратимого цикла Ренкина» необходимо рассчитать теоретический цикл паросиловой установки (цикл Ренкина), определить его термический КПД и сравнить с термическим КПД обратимого цикла Карно в том же интервале температур. При этом необходимо усвоить, что термический КПД (термический коэффициент) обратимого цикла Ренкина характеризует лишь степень превратимости тепловой энергии источника в механическую энергию, допускаемую вторым законом термодинамики.

В действительном цикле Ренкина из-за различных необратимых потерь величина отданной теплосиловой установкой (ТСУ) внешнему потребителю энергии уменьшится.

Для оценки эффективности действительных циклов теплосиловых установок в настоящее время используют два основных метода – коэффициентов полезного действия и эксергетический.

Метод коэффициентов полезного действия заключается в определении потерь теплоты на отдельных участках цикла и в различных элементах установки, обусловленных лишь внутренней необратимостью, вызванной наличием трения при течении рабочего тела, механическими и электрическими потерями. В основе этого метода лежит первый закон термодинамики.

Эксергетический метод анализа теплосиловых установок базируется одновременно на первом и втором законах термодинамики. Его сущность – определение потерь работоспособности во всех элементах установки и для всей

ТСУ в целом, обусловленных конечной разностью температур источника тепла и рабочего тела (внешняя необратимость).

В разделе «Анализ необратимого цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия» студент должен познакомиться с принципом определения внутренних необратимых потерь и способом вычисления внутреннего относительного КПД и внутреннего абсолютного КПД цикла.

Потери в каждом из элементов установки оцениваются в общем случае эффективными КПД этого элемента, а эффективность теплосиловой установки электростанции в целом определяется ее эффективным абсолютным КПД. Определяя необратимые тепловые потери в различных элементах установки, можно построить графически диаграмму ее тепловых потоков (см. рис. 5, Прил. Б), показывающую, какая доля тепловой энергии источника может быть преобразована в электрическую энергию на тепловой электростанции.

В разделе «Анализ необратимого цикла Ренкина с помощью эксергетического метода» каждый элемент теплосиловой установки рассматривается как самостоятельная неизолированная система. Студенту необходимо определить потери эксергии и эксергетический КПД каждого элемента и всей ТСУ в целом.

По аналогии с диаграммой тепловых потоков можно построить диаграмму потоков эксергии рассмотренной паросиловой установки (см. рис. 7, Прил. Б), показывающую, какая доля потока эксергии теплоты, выделившейся при сгорании топлива в топке котлоагрегата, превращается в полезную работу.

После выполнения всех расчетов студент должен сопоставить результаты анализа действительного цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия с результатами анализа по эксергетическому методу. При сравнении результатов анализа необходимо отметить общность использованных методов и имеющиеся в них отличия. Кроме того, следует обратить особое внимание на количественную величину потерь теплоты и потерь эксергии в котлоагрегате и в конденсаторе и объяснить несовпадение результатов при их определении разными методами.

Список использованной литературы должен содержать сведения об источниках, которые были использованы в процессе выполнения курсовой работы. Не допускается включение в список источников информации, которыми студент не пользовался. На каждый источник в тексте должна быть ссылка.

Графическая часть курсовой работы включает в себя следующее:

- принципиальную тепловую схему электростанции;
- изображение теоретического цикла Ренкина в диаграмме  $T-s$ ;
- изображение теоретического и действительного процессов повышения давления воды в насосе в диаграммах  $h-s$  (а) и  $T-s$  (б);
- изображение теоретического и действительного процессов расширения пара в турбине в диаграммах  $h-s$  (а) и  $T-s$  (б);
- диаграмму тепловых потоков, построенную на основании анализа необратимого цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия;
- изображение необратимого цикла Ренкина в диаграмме  $T-s$ ;
- диаграмму потоков эксергии, построенную на основании анализа необратимого цикла Ренкина с помощью эксергетического метода.

При изображении теоретического и действительного цикла Ренкина, процессов повышения давления и расширения в диаграммах  $T-s$  и  $h-s$ , а также при построении диаграмм тепловых потоков и потоков эксергии должны быть выбраны масштабы для величин абсолютной температуры  $T$ , удельной энтропии  $s$ , удельной энтальпии  $h$ , величины теплового потока  $q$  и потока эксергии  $\varepsilon$  (см. рис. 2-7, Прил. Б).

### 3 Правила оформления курсовой работы

Курсовая работа состоит из пояснительной записки и графической части.

Пояснительная записка выполняется печатным способом на стандартных листах формата А4 без рамок и распечатывается с одной стороны листа бумаги.

Текст курсовой работы оформляется согласно требованиям ГОСТ 2.105-95 «Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Общие требования к текстовым документам».

Рекомендуется набирать текст работы шрифтом Times New Roman размером (кеглем) 12 через полуторный межстрочный интервал с выравниванием основного текста по ширине и автоматической расстановкой переносов. Цвет шрифта – черный. Отступ первой строки – 1,25 см. Поля страницы слева – не менее 30 мм, сверху, внизу и справа – не менее 20 мм.

Номера страниц проставляются внизу, посередине. Титульный лист включается в общую нумерацию страниц работы, но номер страницы на нем не ставится.

Разделы должны иметь порядковую нумерацию в пределах всей пояснительной записки, подразделы нумеруются внутри раздела. Заголовки разделов и подразделов печатаются полужирным шрифтом с выравниванием текста по центру. Подчеркивание и перенос слов в заголовках не допускается, точка в конце заголовка не ставится. От текста заголовки отделяются одним интервалом.

Рисунки, таблицы, формулы следует нумеровать арабскими цифрами. Нумерация может быть как сквозной по всему тексту, так и внутри раздела. В тексте курсовой работы на все таблицы и рисунки обязательно должны быть ссылки. Таблицы и рисунки помещают после упоминания о них в тексте или на следующей странице. От основного текста рисунки, таблицы и формулы отделяются отступом в один интервал.

Слово «Таблица» указывается слева над таблицей, следом идет номер и название таблицы. Если таблица занимает несколько страниц, то в начале каждой следующей страницы пишут: «Продолжение таблицы», с указанием ее номера. При этом столбцы таблицы должны быть пронумерованы.

Рисунки нумеруются и подписываются снизу посередине.

Если в курсовой работе только одна таблица или один рисунок, они не нумеруются.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила состав-

ления». Список формируется в алфавитном порядке, или в порядке появления в тексте ссылок на использованные источники. Ссылка приводится в квадратных скобках и соответствует порядковому номеру источника в списке литературы.

Графическая часть должна быть выполнена с использованием компьютерной графики, либо от руки на листах миллиметровой бумаги формата А4 (каждая схема на отдельном листе). Оформление графических материалов должно соответствовать требованиям действующих стандартов ЕСКД.

В курсовой работе могут быть использованы полученные путем сканирования изображения, но лишь при условии высокого качества сканирования и последующей обработки, а также при соблюдении пропорций.

Графический материал можно оформить в виде приложений, которые должны иметь сквозную буквенную нумерацию и заголовки. Приложения обозначаются заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Ё, З, Й, О, Ч, Ь, Ы, Ъ. Буква следует после слова «Приложение». Заголовки приложения записываются отдельной строкой с прописной буквы.

#### **4 Защита курсовой работы**

Курсовая работа должна быть выполнена студентом до завершения курса лекций и лабораторного практикума. Выполненная в соответствии с заданием курсовая работа защищается на собеседовании у преподавателя.

По результатам защиты курсовой работы выставляется экспертная оценка («отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно»), которая учитывается при промежуточной аттестации по дисциплине (на экзамене). Система оценивания и критерии выставления оценки за курсовую работу следующие:

– «отлично» – студент обладает полнотой знаний в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок, методов их анализа, может составить простейшую тепловую схему электростанции, знает назначение и принцип действия основных элементов этой схемы: парового котла, паровой турбины, конденсатора, насоса. Студент при выполнении работы, помимо рекомендованной литературы, использовал дополнительные источники информации. Студент не только владеет методикой расчета цикла паротурбинной установки, но и в состоянии проанализировать полученные результаты и предложить пути повышения эффективности работы, как отдельных элементов цикла, так и всей паросиловой установки в целом.

– «хорошо» – студент обладает набором знаний в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок, методов их анализа, знает назначение и принцип действия основных элементов цикла. При выполнении работы студент пользовался всей рекомендованной литературой. Студент владеет методикой расчета цикла паротурбинной установки и понимает её основы.

– «удовлетворительно» – студент обладает минимальным набором знаний в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок, методов их анализа, может объяснить назначение и принцип действия основных

элементов цикл. При выполнении работы студент использовал часть рекомендованной литературой. Студент в состоянии выполнить расчет цикла паротурбиной установки в соответствии с предложенной методикой;

– «неудовлетворительно» – обладает частичными и разрозненными знаниями в области теоретических и действительных циклов паросиловых установок, которые не может корректно связывать между собой. Студент не может находить необходимую информацию, либо в состоянии находить отдельные фрагменты информации в рамках поставленной задачи. Студент лишь частично освоил предложенную методику расчетов, допускает ошибки при ответах на вопросы.

Студенту, получившему неудовлетворительную оценку, предоставляется право доработки курсовой работы и определяется новый срок её защиты.

## 5 Варианты заданий к курсовой работе

В качестве исходных данных для расчета задаются начальные параметры пара перед турбиной (температура  $t_1$  и давление  $p_1$ ) и конечное давление пара в конденсаторе  $p_2$ . Варианты заданий даны в таблице 1.

Таблица 1 – Варианты заданий

Номер варианта	Параметр		
	Температура пара перед турбиной $t_1$ , °С	Давление пара перед турбиной $p_1$ , МПа (бар)	Давление пара в конденсаторе $p_2$ , кПа (бар)
1	2	3	4
1	500	9,0 (90)	4,0 (0,04)
2	480		
3	460		
4	440		
5	420		
6	540	13,0 (130)	
7	520		
8	500		
9	480		
10	460		
11	580	17,0 (170)	
12	560		
13	540		
14	520		
15	500		
16	500	6,0 (60)	4,5 (0,045)
17	480		

1	2	3	4
18	460	6,0 (60)	4,5 (0,045)
19	440		
20	420		
21	540	11,0 (110)	
22	520		
23	500		
24	480		
25	460		
26	580	14,0 (140)	
27	560		
28	540		
29	520		
30	500		

В зависимости от того, для какой системы единиц имеются в распоряжении студента диаграммы и таблицы, величины давлений могут быть заданы в барах (бар) или в мегапаскалях (МПа). Температура пара задается в градусах Цельсия ( $^{\circ}\text{C}$ ) и в Кельвинах (К) по абсолютной термодинамической шкале. Все расчеты необходимо производить в международной системе единиц (СИ).

## 6 Методика выполнения курсовой работы

Порядок расчетов при анализе обратимого и необратимого циклов Ренкина с числовыми примерами дан в таблицах 2-4. Численные значения величин соответствуют расчету в международной системе единиц (на основе килоджоуля, МПа).

Все расчеты в пояснительной записке должны быть представлены в табличной форме, как это сделано в примерах в таблицах 2-4.

### 6.1 Термодинамический анализ обратимого цикла Ренкина

Порядок расчета с числовым примером приведен в таблице 2. Заданы начальные параметры пара:  $p_1 = 16,67$  МПа (166,7 бар),  $t_1 = 550$   $^{\circ}\text{C}$  ( $T_1 = 823,15\text{K}$ ). Давление в конденсаторе  $p_2 = 4$  кПа (0,04 бар). Способ определения величин указан в столбце 3 этой таблицы.

Построение цикла в диаграмме  $T-s$  показано на рисунке 2 Приложения Б. Здесь 1-2 – адиабатный процесс расширения пара в турбине; 2-3 – изобарно-изотермический процесс отвода теплоты в конденсаторе; 3-4 – адиабатный процесс в насосе; 4-5-6-1 – изобарный процесс передачи теплоты в котле и пароперегревателе от газов к воде (4-5), пароводяной смеси (5-6) и к перегретому пару (6-1).

Таблица 2 – Термодинамический анализ обратимого цикла Ренкина

№ п/п	Наименование величины	Способ определения величины	Величина
1	2	3	4
1.	Энтальпия пара перед турбиной, кДж/кг	$h_1=f(p_1;t_1)$ , по таблицам [1] или диаграмме $h-s$ [2]	3433
2.	Энтропия пара перед турбиной, кДж/(кг·К)	$s_1=f(p_1;t_1)$ , по таблицам [1] или диаграмме $h-s$ [2]	6,4575
3.	Энтальпия пара за турбиной, кДж/кг	$h_2=f(p_2)$ , по диаграмме $h-s$ [2]	1945
4.	Энтропия пара за турбиной, кДж/(кг·К)	$s_2= s_1$	6,4575
5.	Энтальпия воды на линии насыщения при давлении $p_2$ , кДж/кг	$h_3=f(p_2)$ , по таблицам [1]	121,4
6.	Температура воды и пара при давлении $p_2$ , (температура насыщения), °С (К)	$t_2=f(p_2)$ , по таблицам [1] $T_2= t_2+273,15$	28,96 (302,11)
7.	Энтропия воды на линии насыщения при давлении $p_2$ , кДж/(кг·К)	$s_3=f(p_2)$ , по таблицам [1]	0,4224
8.	Энтропия воды за насосом, кДж/(кг·К)	$s_4= s_3$	0,4224
9.	Энтальпия воды за насосом, кДж/кг	$h_4=f(p_1; s_4)$ , по таблицам [1]	138
10.	Температура воды за насосом, °С (К)	$t_4=f(p_1; h_4)$ , по таблицам [1] $T_4= t_4+273,15$	29,3 (302,45)
11.	Работа расширения (теоретическая), кДж/кг	$\ell_T^T = (h_1 - h_2)$	1488
12.	Работа сжатия (теоретическая), кДж/кг	$\ell_H^T = (h_4 - h_3)$	16,6
13.	Теплота, подведенная в цикле, кДж/кг	$q_1 = (h_1 - h_4)$	3295
14.	Термический КПД обратимого цикла Ренкина	$\eta_t = \frac{\ell_T^T - \ell_H^T}{q_1}$	0,45

1	2	3	4
15.	Термический КПД обратимого цикла Карно	$\eta_t^K = 1 - \frac{T_2}{T_1}$	0,63
16.	Степень термодинамического совершенства обратимого цикла Ренкина	$\eta = \eta_t / \eta_t^K$	0,71

## 6.2 Анализ необратимого цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия

Метод коэффициентов полезного действия при анализе необратимых циклов предполагает использование лишь первого закона термодинамики. Порядок расчета с числовым примером приведен в таблице 3. Способ определения всех величин указан в столбце 3 этой таблицы. Построение действительных процессов в насосе и турбине в диаграммах  $T-s$  и  $h-s$  в отличие от теоретических показано на рисунках 3 и 4 Приложения Б. При этом необходимо сделать ряд пояснений (см. л. 3):

1) Поскольку в процессе анализа предполагается всюду пренебрегать работой насоса, абсолютный электрический КПД турбогенераторной установки  $\eta_e^{TF}$  (см. п. 16 табл. 3) не учитывает затрат на привод насоса. Если нужно определить КПД более строго, с учетом этих величин, то при расчете из  $\ell$ , следует вычесть затраты энергии на привод насоса  $\ell_n^A$ .

2) При определении количества теплоты, подведенной к рабочему телу в цикле, мы имеем в виду разность энтальпий ( $h_1 - h_{4д}$ ), где  $h_1$  – энтальпия пара, поступающего в турбину при давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$ . Следует, однако, иметь в виду, что в паровом котле пар нагревается до температуры, превышающей  $T_1$ . При движении по паропроводу из котельной к турбине вследствие неизбежных теплопотерь через стенки паропровода пар несколько охлаждается. Если обозначить температуру и энтальпию, которые имеет пар на выходе из котла, соответственно  $T_1^0$  и  $h_1^0$ , то тепловой КПД паропровода  $\eta_{пп}$  можно определить следующим образом:

$$\eta_{пп} = \frac{h_1 - h_{4д}}{h_1^0 - h_{4д}}.$$

В результате, задав значение  $\eta_{пп}$ , можно определить энтальпию пара на выходе из котла (см. п. 18 табл. 3).

3) Потерю теплоты на участке турбина - конденсатор и в конденсаторопроводе от конденсатора до котла не будем учитывать вследствие ее малости.

Для того, чтобы познакомиться с некоторыми технико-экономическими показателями работы тепловой электрической станции (эффективным удельным расходом топлива, часовым расходом топлива и др.) и порядком их вели-

чин (см. пп. 23-26 расчета), можно задать низшую теплоту сгорания топлива  $Q_H^P$  и эффективную мощность установки  $N_e$ .

В пп. 27-36 расчетной таблицы 3 тепловой баланс паросиловой установки приведен в относительных величинах, когда за 100% принято тепло, выделившееся в топке котла. Определяются в процентах статьи потерь этого тепла по различным каналам и доля тепловой энергии, превращенная в электроэнергию. По этим данным строится диаграмма тепловых потоков (см. рис. 5, Приложение Б).

Таблица 3 – Анализ цикла Ренкина с учетом необратимых потерь по методу коэффициентов полезного действия

№ п/п	Наименование величины	Способ определения величины	Величина
1	2	3	4
1.	Внутренний относительный КПД турбины	$\eta_{oi}^T = 0,85 - 0,90$ , принимаем	0,85
2.	Внутренний относительный КПД насоса	$\eta_{oi}^H = 0,85 - 0,90$ , принимаем	0,90
3.	Действительная энтальпия пара за турбиной, кДж/кг	$h_{2д} = h_1 - \eta_{oi}^T \cdot (h_1 - h_2)$	2168
4.	Действительная работа турбины, кДж/кг	$\ell_T^Д = h_1 - h_{2д}$	1265
5.	Действительная энтальпия воды за насосом, кДж/кг	$h_{4д} = h_3 + \frac{h_4 - h_3}{\eta_{oi}^H}$	139,8
6.	Действительная работа насоса, кДж/кг	$\ell_H^Д = h_{4д} - h_3$	18,4
7.	Необратимые потери в турбине, кДж/кг	$h_{2д} - h_2$	223
8.	Необратимые потери в насосе, кДж/кг	$h_{4д} - h_4$	1,8
9.	Внутренний относительный КПД цикла	$\eta_{oi}^Ц = \frac{\ell_{Ц}^Д}{\ell_{Ц}^{обр}} = \frac{\ell_T^Д - \ell_H^Д}{\ell_T^Д - \ell_H^Д} =$ $= \frac{(h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi}^T - \frac{(h_4 - h_3)}{\eta_{oi}^H}}{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}$	0,85
10.	Внутренний абсолютный КПД цикла	$\eta_i^Ц = \eta_t \cdot \eta_{oi}^Ц$	0,38

Продолжение табл. 3

1	2	3	4
11.	Механический КПД турбины	$\eta_m = 0,97 - 0,995,$ принимаем	0,97
12.	Механическая работа турбины <sup>*)</sup> , кДж/кг	$\ell_T^M = \ell_T^A \cdot \eta_m$	1227
13.	Абсолютный эффективный КПД турбинной установки	$\eta_e^T = \frac{\ell_T^M}{q_1} = \eta_i^H \cdot \eta_m = \eta_t \cdot \eta_{oi}^H \cdot \eta_m$	0,37
14.	КПД электрогенератора	$\eta_\Gamma = 0,97 - 0,99,$ принимаем	0,98
15.	Работа, передаваемая внешнему потребителю (электроэнергия в сеть), кДж/кг	$\ell_\varepsilon = \ell_T^M \cdot \eta_\Gamma$	1202
16.	Абсолютный электрический КПД турбогенераторной установки	$\eta_e^{T\Gamma} = \frac{\ell_\varepsilon}{q_1} = \eta_e^T \cdot \eta_\Gamma = \eta_t \cdot \eta_{oi}^H \cdot \eta_m \cdot \eta_\Gamma$	0,36
17.	КПД паропровода	$\eta_{пп} = 0,98 - 0,99,$ принимаем	0,99
18.	Энтальпия пара на выходе из котла, кДж/кг	$h_1^0 = h_{4д} + \frac{h_1 - h_{4д}}{\eta_{пп}}$	3466
19.	Тепло, переданное в котле воде и пару, кДж/кг	$h_1^0 - h_{4д}$	3326
20.	КПД котла	$\eta_{ка} = 0,89 - 0,93,$ принимаем	0,91
21.	Тепло, выделяющееся в топке при сгорании топлива на 1 кг пара с энтальпией $h_1^0$ , кДж/кг	$q' = \frac{h_1^0 - h_{4д}}{\eta_{ка}} = \frac{h_1 - h_{4д}}{\eta_{пп} \cdot \eta_{ка}}$	3655
22.	Эффективный абсолютный КПД всей теплосиловой установки <sup>**)</sup>	$\eta_e^{уст} = \frac{\ell_\varepsilon}{q'} = \eta_e^{T\Gamma} \cdot \eta_{ка} \cdot \eta_{пп} =$ $= \eta_t \cdot \eta_{oi}^H \cdot \eta_m \cdot \eta_\Gamma \cdot \eta_{ка} \cdot \eta_{пп}$	0,33
23.	Низшая теплота сгорания условного топлива, кДж/кг	$Q_H^P,$ задаем	29310
24.	Эффективный удельный расход условного топлива (на 1 кВт·ч электроэнергии), кг/кВт·ч (г/кВт·ч)	$b_e^{уст} = \frac{3600}{Q_H^P \cdot \eta_e^{уст}} = \frac{0,123}{\eta_e^{уст}}$	0,373 (373)

1	2	3	4
25.	Эффективная мощность установки, кВт	$N_e$ , задаем	210000
26.	Часовой расход условного топлива, кг/ч (т/ч)	$B = b_e^{уст} \cdot N_e$	78273 (78,3)
Далее проведем тепловой баланс паротурбинной ТСУ, приняв выделившуюся при сгорании топлива теплоту $q'$ за 100%			
27.	Тепло, выделившееся в топке котла, %	$q'$	100
28.	Потеря тепла в котле, %	$\Delta q_{ка} = (1 - \eta_{ка}) \cdot q'$	9
29.	Потери тепла в паропроводах, %	$\Delta q_{пп} = (1 - \eta_{пп}) \cdot \eta_{ка} \cdot q'$	1
30.	Тепло, поступившее с паром в турбину, %	$q_1 = q' - \Delta q_{ка} - \Delta q_{пп}$	90
31.	Тепло, отводимое в конденсаторе, %	$q_2^д = (1 - \eta_i^н) \cdot \eta_{пп} \cdot \eta_{ка} \cdot q'$	55
32.	Суммарные потери в котле, паропроводах, конденсаторе, %	$\Sigma q = \Delta q_{ка} + \Delta q_{пп} + q_2^д$	65
33.	Механические потери в турбине, %	$\Delta q_m = (1 - \eta_m) \cdot \eta_i^н \times$ $\times \eta_{пп} \cdot \eta_{ка} \cdot q'$	1
34.	Механические и электрические потери в генераторе, %	$\Delta q_{г} = (1 - \eta_{г}) \cdot \eta_m \times$ $\times \eta_i^н \cdot \eta_{пп} \cdot \eta_{ка} \cdot q'$	1
35.	Работа, переданная внешнему потребителю (электроэнергия), %	$\ell_э = \eta_e^{уст} \cdot q'$	33
36.	Тепловой баланс теплосиловой паротурбинной установки, работающей по циклу Ренкина, %	$q' = \ell_э + q_2^д + \Delta q_{г} +$ $+ \Delta q_m + \Delta q_{пп} + \Delta q_{ка}$	100

\*<sup>1</sup>) Более строго:  $\ell_{ц}^д$ , здесь и далее мы пренебрегаем работой насоса

\*\*<sup>2</sup>) Пренебрегаем работой насоса  $h_4 \approx h_{4д}$

### 6.3 Анализ необратимого цикла Ренкина с помощью эксергетического метода

Эксергетический метод термодинамического анализа необратимых циклов базируется на использовании первого и второго законов термодинамики. В этом методе каждый элемент установки рассматривается как самостоятельная неизолированная система. В случае ТСУ такими элементами являются: котлоагрегат, паропровод, турбогенераторная установка, конденсатор и насос (см. рис.1, Приложение Б). Определяются коэффициент потери эксергии и эксергетический КПД каждого элемента и всей ТСУ в целом.

Условное изображение необратимого цикла Ренкина в  $T-s$  диаграмме показано на рисунке 6 Приложения Б. Здесь 1-2д – адиабатный процесс расширения пара в турбине с учетом необратимых потерь на трение; 2д-3 – изобарно-изотермический процесс отвода теплоты в конденсаторе; 3-4д – адиабатный процесс в насосе с учетом необратимых потерь на трение; 4д-5-6-0 – изобарный процесс (без учета гидравлических сопротивлений  $p_1^0 = p_{4д}$ ) передачи теплоты от газов к воде (4д-5), пароводяной смеси (5-6) и к перегретому пару (6-0) в котле. Кривая 0-1 условно изображает снижение температуры пара с  $T_1^0$  до  $T_1$  и давления с  $p_1^0$  до  $p_1$  на пути от котла до турбины вследствие потерь в паропроводе. Энтропия рабочего тела при отводе теплоты в результате этих потерь уменьшается. Соответственно уменьшается и полезная работа цикла (как теоретическая, так и действительная). На этой же диаграмме штриховой линией нанесены изотермы, соответствующие температурам горячего источника (температура в топке  $T_T$ ) и приемника теплоты (температура охлаждающей воды  $T_0$ ).

Примем для рассматриваемого нами примера температуру в топке  $t_T = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_T = 2273,15 \text{ K}$ ), а температуру окружающей среды равной температуре охлаждающей воды  $t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $T_0 = 283,15 \text{ K}$ ). Давление окружающей среды  $p_0 = 98 \text{ кПа}$ .

Порядок расчета эксергетическим методом с числовым примером приведен в таблице 4. Способ определения всех величин указан в столбце 3 этой таблицы.

Эксергия потока рабочего тела определяется уравнением

$$\varepsilon_h = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0),$$

а эксергия потока теплоты  $q$  уравнением

$$\varepsilon_q = q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right),$$

причем потеря эксергии потока рабочего тела, проходящего через тепловой аппарат, к которому одновременно подводится теплота  $q$ , равна

$$\nabla \varepsilon_h = [(\varepsilon_h^{\text{ВХ}} + \varepsilon_q^{\text{ВХ}}) - \varepsilon_h^{\text{ВЫХ}}] - \ell_{\text{пол}},$$

где  $\ell_{\text{пол}}$  – полезная работа, производимая этим аппаратом и отдаваемая внешнему потребителю [3].

По результатам расчета строится диаграмма потоков эксергии (см. рис.7, Приложение Б), показывающая, какая доля эксергии тепла превращается в полезную работу, а какая доля потока эксергии уходит в виде потерь и в каких элементах установки. На этой диаграмме за 100 % принята эксергия теплоты, выделившейся при сгорании топлива в топке котлоагрегата.

Таблица 4 – Расчет необратимого цикла Ренкина с помощью эксергетического метода

№ п/п	Наименование величины	Способ определения величины	Величина
1	2	3	4
<b>КОТЛОАГРЕГАТ</b>			
<u>Вход:</u> теплота $q'$ от горячего источника с температурой $T_T = 2273,15 \text{ K}$ ( $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ); поток питательной воды с температурой $T_{4д}$ и давлением $p_1^{0*}$ .			
<u>Выход:</u> поток перегретого пара с параметрами $T_1^0, p_1^0, h_1^0$ .			
1.	Энтальпия питательной воды при параметрах окружающей среды, кДж/кг	$h_0 = (p_0; T_0)$ , по таблицам [1]	42,1
2.	Энтальпия питательной воды при параметрах окружающей среды, кДж/(кг·К)	$s_0 = f(p_0; T_0)$ , по таблицам [1]	0,1511
3.	Энтропия питательной воды на входе в котёл, кДж/(кг·К)	$s_{4д} = f(p_1^0; h_{4д})$ , по таблицам [1]	0,4281
4.	Эксергия питательной воды на входе в котел, кДж/кг	$\mathcal{E}_{h \text{ ка}}^{\text{ВХ}} = (h_{4д} - h_0) - T_0 \cdot (s_{4д} - s_0)$	19,4
5.	Эксергия потока теплоты $q'$ , кДж/кг	$\mathcal{E}_{q \text{ ка}}^{\text{ВХ}} = q' \cdot (1 - \frac{T_0}{T_T})$ (см. табл.3 п.21)	3200
6.	Энтропия пара на выходе из котла, кДж/(кг·К)	$s_1^0 = f(p_1^0; h_1^0)$ , по таблицам [1] или диаграмме $h-s$ [2]	6,4978
7.	Эксергия пара на выходе из котла, кДж/кг	$\mathcal{E}_{h \text{ ка}}^{\text{ВЫХ}} = (h_1^0 - h_0) - T_0 \cdot (s_1^0 - s_0)$	1627
8.	Потери эксергии в котлоагрегате, кДж/кг	$\nabla \mathcal{E}_{\text{ка}} = \mathcal{E}_{h \text{ ка}}^{\text{ВХ}} + \mathcal{E}_{q \text{ ка}}^{\text{ВХ}} - \mathcal{E}_{h \text{ ка}}^{\text{ВЫХ}}$	1592

1	2	3	4
	- потери эксергии, обусловленные потерями теплоты в окружающую среду, кДж/кг	$\nabla \varepsilon'_{ка} = (1 - \eta_{ка}) \cdot q' \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_T}\right)$	288
	- потери эксергии, обусловленные термодинамическим несовершенством процессов в котельной установке, кДж/кг	$\nabla \varepsilon''_{ка} = \nabla \varepsilon_{ка} - \nabla \varepsilon'_{ка}$	1304
9.	Эксергетический КПД котельной установки	$\eta_{экс}^{ка} = \frac{\varepsilon_{ка}^{вых}}{\varepsilon_{ка}^{вх}} = \frac{\varepsilon_{h\ ка}^{вых}}{\varepsilon_{h\ ка}^{вх} + \varepsilon_{q\ ка}^{вх}}$	0,505
<b>ПАРОПРОВОД</b>			
<u>Вход:</u> поток пара с параметрами $p_1^0$ и $T_1^0$ .			
<u>Выход:</u> поток пара с параметрами $p_1$ и $T_1$ .			
10.	Эксергия пара на входе в паропровод, кДж/кг	$\varepsilon_{h\ пп}^{вх} = \varepsilon_{h\ ка}^{вых}$	1627
11.	Эксергия пара на выходе из паропровода, кДж/кг	$\varepsilon_{h\ пп}^{вых} = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0)$	1605
12.	Потери эксергии в паропроводе, кДж/кг	$\nabla \varepsilon_{пп} = \varepsilon_{h\ пп}^{вх} - \varepsilon_{h\ пп}^{вых}$	22
13.	Эксергетический КПД паропровода	$\eta_{экс}^{пп} = \frac{\varepsilon_{h\ пп}^{вых}}{\varepsilon_{h\ пп}^{вх}}$	0,987
<b>ТУРБОГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА</b>			
<u>Вход:</u> поток пара с параметрами $p_1$ и $T_1$ .			
<u>Выход:</u> работа $\ell_{пол} = \ell_{э}$ ; поток пара с параметрами $p_2$ и $T_{2д}$ .			
14.	Эксергия потока пара на входе в турбину, кДж/кг	$\varepsilon_{h\ т}^{вх} = \varepsilon_{h\ пп}^{вых}$	1605
15.	Энтропия пара на выходе из турбины, кДж/(кг·К)	$s_{2д} = f(p_2; h_{2д}),$ по таблицам [1] или диаграмме $h-s$ [2]	7,1968
16.	Эксергия потока пара на выходе из турбины, кДж/кг	$\varepsilon_{h\ т}^{вых} = (h_{2д} - h_0) - T_0 \cdot (s_{2д} - s_0)$	131
17.	Потери эксергии в турбогенераторной установке, кДж/кг	$\nabla \varepsilon_T = (\varepsilon_{h\ т}^{вх} - \varepsilon_{h\ т}^{вых}) - \ell_{э}$ (см. табл.3 п.15)	272

1	2	3	4
	- потери эксергии, обусловленные механическими потерями в турбине, кДж/кг	$\nabla \varepsilon'_T = (h_1 - h_{2д}) \cdot (1 - \eta_m)$	38
	- механическими и электрическими потерями в электрогенераторе, кДж/кг	$\nabla \varepsilon''_T = (h_1 - h_{2д}) \cdot \eta_m \cdot (1 - \eta_g)$	25
	- потери, вызываемые необратимым характером процесса расширения в турбине, кДж/кг	$\nabla \varepsilon'''_T = \nabla \varepsilon_T - \nabla \varepsilon'_T - \nabla \varepsilon''_T$	209
18.	Эксергетический КПД турбогенераторной установки	$\eta_{\text{экс}}^T = \frac{\ell_{\varepsilon}}{\varepsilon_{h_T}^{\text{ВХ}} - \varepsilon_{h_T}^{\text{ВЫХ}}}$	0,816
<b>КОНДЕНСАТОР</b>			
<u>Вход:</u> поток пара с параметрами $p_2$ и $T_{2д}$ .			
<u>Выход:</u> поток конденсата с параметрами $p_2$ и $T_3 = T_{2д}$ .			
19.	Эксергия пара на входе в конденсатор, кДж/кг	$\varepsilon_{h_K}^{\text{ВХ}} = \varepsilon_{h_T}^{\text{ВЫХ}}$	131
20.	Энтропия воды в состоянии насыщения при давлении $p_2$ , кДж/(кг·К)	$s_3 = f(p_2)$ , (см. табл. 2 п.7)	0,4224
21.	Эксергия конденсата, выходящего из конденсатора, кДж/кг	$\varepsilon_{h_K}^{\text{ВЫХ}} = (h_3 - h_0) - T_0 \cdot (s_3 - s_0)$	2,6
22.	Потери эксергии в конденсаторе, кДж/кг	$\nabla \varepsilon_K = \varepsilon_{h_K}^{\text{ВХ}} - \varepsilon_{h_K}^{\text{ВЫХ}}$	128
<b>НАСОС</b>			
<u>Вход:</u> поток конденсата с параметрами $p_2$ и $T_3$ ; работа насоса $\ell_H^D$ .			
<u>Выход:</u> питательная вода с параметрами $T_{4д}$ и $p_1^0$			
23.	Эксергия конденсата на входе в насос, кДж/кг	$\varepsilon_{h_H}^{\text{ВХ}} = \varepsilon_{h_K}^{\text{ВЫХ}}$	2,6
24.	Действительная работа насоса, кДж/кг	$\ell_H^D = h_{4д} - h_3$	18,4
25.	Эксергия питательной воды на выходе из насоса, кДж/кг	$\varepsilon_{h_H}^{\text{ВЫХ}} = \varepsilon_{h_{ка}}^{\text{ВХ}}$	19,4

1	2	3	4
26.	Потери эксергии в насосе, кДж/кг	$\nabla \varepsilon_{\text{H}} = \varepsilon_{h_{\text{H}}}^{\text{ВЫХ}} + \ell_{\text{H}}^{\text{Д}} - \varepsilon_{h_{\text{H}}}^{\text{ВЫХ}}$	1,6
27.	Эксергетический КПД насоса	$\eta_{\text{ЭКС}}^{\text{H}} = \frac{\varepsilon_{h_{\text{H}}}^{\text{ВЫХ}} - \varepsilon_{h_{\text{H}}}^{\text{ВХ}}}{\ell_{\text{H}}^{\text{Д}}}$	0,912
<b>ОБЩИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЦИКЛА</b>			
28.	Термический КПД обратимого цикла Карно в интервале температур $T_{\text{max}} = T_{\text{T}}$ и $T_{\text{min}} = T_0$	$\eta_t^{\text{ОЦК}} = 1 - \frac{T_0}{T_{\text{T}}}$	0,875
29.	Эксергия тепла, подведённого в цикле (макс. полезная работа), кДж/кг	$\varepsilon = \ell_{\text{ПОЛ}}^{\text{max}} = q' \cdot \eta_t^{\text{ОЦК}}$ (см. табл. 3 п. 21)	3200
30.	Потери эксергии в установке, кДж/кг	$\nabla \varepsilon = \nabla \varepsilon_{\text{КА}} + \nabla \varepsilon_{\text{ПП}} + \nabla \varepsilon_{\text{T}} + \nabla \varepsilon_{\text{К}} + \nabla \varepsilon_{\text{H}}$	2016,2
31.	Эксергетический КПД установки	$\eta_{\text{ЭКС}} = 1 - \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon}$	0,37
32.	Эффективный абсолютный КПД всей установки	$\eta_{\text{е}}^{\text{УСТ}} = \eta_{\text{ЭКС}} \cdot \eta_t^{\text{ОЦК}}$	0,33
33.	Потери эксергии относительные**), %	$\nabla \varepsilon = \frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon} \cdot 100$	63
	- в котлоагрегате, %	$\nabla \varepsilon_{\text{КА}} = \frac{\nabla \varepsilon_{\text{КА}}}{\varepsilon} \cdot 100$	49,8
	- в паропроводе, %	$\nabla \varepsilon_{\text{ПП}} = \frac{\nabla \varepsilon_{\text{ПП}}}{\varepsilon} \cdot 100$	0,7
	- в турбогенераторной установке, %	$\nabla \varepsilon_{\text{T}} = \frac{\nabla \varepsilon_{\text{T}}}{\varepsilon} \cdot 100$	8,5
	- в конденсаторе, %	$\nabla \varepsilon_{\text{К}} = \frac{\nabla \varepsilon_{\text{К}}}{\varepsilon} \cdot 100$	4
	- в насосе, %	$\nabla \varepsilon_{\text{H}} = \frac{\nabla \varepsilon_{\text{H}}}{\varepsilon} \cdot 100$	0,05

\*) Здесь и далее считаем  $p_1^0 = p_1$ .

\*\*) Питательная вода (конденсат) возвращается в цикл нагретой с температурой выше, чем у окружающей среды. Но ее эксергия  $\approx 2,5$  кДж/кг – это всего 0,08%.

## 7 Сопоставление результатов анализа действительного цикла Ренкина по методу коэффициентов полезного действия с результатами анализа по эксергетическому методу

При сопоставлении результатов анализа необратимого цикла Ренкина следует обратить внимание построенные на основе расчетов диаграммы тепловых потоков (рис.5, Приложение Б) и потоков эксергии (рис.7, Приложение Б). При совместном рассмотрении этих диаграмм можно при внешнем сходстве заметить их принципиальное различие.

На диаграмме на рис.7 в отличие от рис. 5 за 100% принята не вся теплота, выделившаяся при сгорании топлива, а лишь ее работоспособная часть – эксергия. Диаграмма потоков эксергии показывает, в каких элементах ТСУ и какая доля потока эксергии уходит в виде потерь. И на ней же показано, что часть потока эксергии (правда, практически пренебрежимо малая) возвращается в цикл в виде потока конденсата, поступающего в насос.

Более подробно каналы потерь эксергии представлены результатами расчетов в таблице 5, где определены доли потерь эксергии в каждом элементе установки и причины их происхождения.

Из этой таблицы видно, что наибольшие потери вызваны необратимым теплообменом в котлоагрегате и составляют около 65 % всей суммы потерь эксергии в паросиловой установке или примерно 50 % от эксергии теплоты, подведенной в цикле. Кроме того, котел имеет самый низкий эксергетический КПД из всех элементов ТСУ равный 49,8 %. В тоже время по методу коэффициентов полезного действия потери теплоты в котлоагрегате составляют лишь 9 % от тепла, выделяющегося при сгорании топлива. Т.е. с позиции первого закона термодинамики, паровой котел – это достаточно эффективное тепловое устройство. Однако второй закон термодинамики показывает, что котлоагрегат оказывается самым несовершенным элементом паросиловой установки. Это обусловлено большой разностью температур топочных газов и рабочего тела, которая приводит к недоиспользованию температурного потенциала теплоты, полученной при сжигании топлива [3].

Что касается конденсатора, то с позиции первого закона термодинамики потери теплоты в этом элементе ТСУ составляют 55 %, в то время как в соответствии с эксергетическим методом анализа относительные потери эксергии в конденсаторе не превышают 4 %.

Таким образом, весьма эффективное с позиции первого закона термодинамики тепловое устройство оказывается несовершенным с позиции второго закона и наоборот. И именно эксергетический метод дает возможность найти источники необратимости в элементах паросиловой установки и позволяет наметить возможные пути их сокращения (подробнее см. в [3]).

Для рассмотренного примера при удельном выделении теплоты в топке 3655 кДж/кг; её работоспособная часть (эксергия) составляет 3200 кДж/кг; полезная работа паросиловой установки 1202 кДж/кг; эксергетический КПД установки – 37 %, эффективный абсолютный КПД установки – 33 %.

Таблица 5 – Эксергетические характеристики паросиловой установки

Элементы паросиловой установки	Причина потери эксергии	Потеря эксергии, кДж/кг	Доля потери в данном элементе установки от суммы потерь всей установки $\frac{v_{эj}}{v_{э}}$	Эксергетический КПД элемента установки
Котел	Теплопотери котла	288	0,143	0,505
	Необратимый теплообмен в котле	1304	0,647	
Паропровод	Теплопотери паропровода	22	0,011	0,987
Турбогенераторная установка	Необратимость процесса расширения пара в турбине	209	0,104	0,816
	Механические потери в турбине	38	0,019	
	Механические и электрические потери в электрогенераторе	25	0,012	
Конденсатор	Необратимый теплообмен в конденсаторе	128,6	0,064	-
Насос	Необратимый теплообмен в насосе	1,6	<0,001	0,912
В целом по паросиловой установке		2016,2	1,000	0,37

## Список рекомендуемой литературы

1. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 162 с.
2.  $h,s$  - диаграмма для водяного пара по справочнику А.А. Александрова и Б. А. Григорьева. - М.: Издательство МЭИ, 2003 г.
3. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 496 с.
4. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие для вузов / А.А. Александров. – М.: Издательство МЭИ, 2006. – 158 с.
5. Быстрицкий, Г.Ф. Техническая термодинамика: учебное пособие / Г.Ф. Быстрицкий. – М.: КНОРУС, 2010. – 296 с.
6. Селин, В.В. Техническая термодинамика: учебное пособие / В.В. Селин, В.М. Фокин. – Волгоград: Издательство ВолГАСУ, 2008. – 132 с.

**Образец оформления титульного листа курсовой работы**

Федеральное агентство по рыболовству  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
(ФГБОУ ВО «КГТУ»)

Кафедра судовых энергетических установок и теплоэнергетики

Курсовая работа  
допущена к защите  
руководитель: к.т.н., доц.  
\_\_\_\_\_ ФИО  
(подпись)

Курсовая работа  
защищена с оценкой \_\_\_\_\_  
руководитель: к.т.н., доц.  
\_\_\_\_\_ ФИО  
(подпись)

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ЦИКЛА ПАРОСИЛОВОЙ УСТАНОВКИ  
ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Курсовая работа по дисциплине  
«Техническая термодинамика»  
Вариант № \_\_\_\_

Работу выполнил:  
студент гр. \_\_\_\_\_  
ФИО

Калининград  
20\_\_

Образец оформления графической части курсовой работы

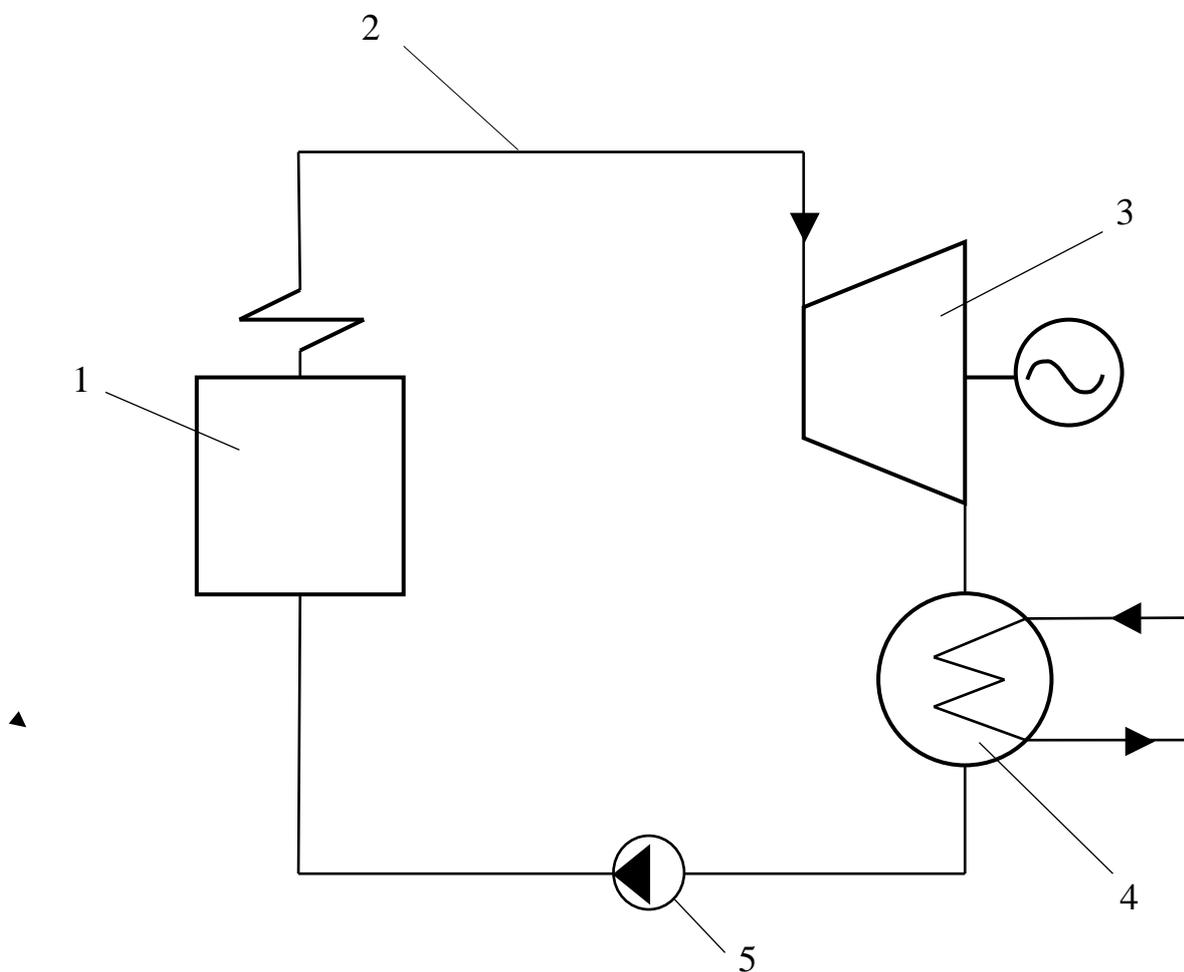


Рис. 1 – Принципиальная тепловая схема электростанции

1 – паровой котел с пароперегревателем; 2 – паропровод; 3 – турбогенераторная установка;  
4 – конденсатор; 5 – насос

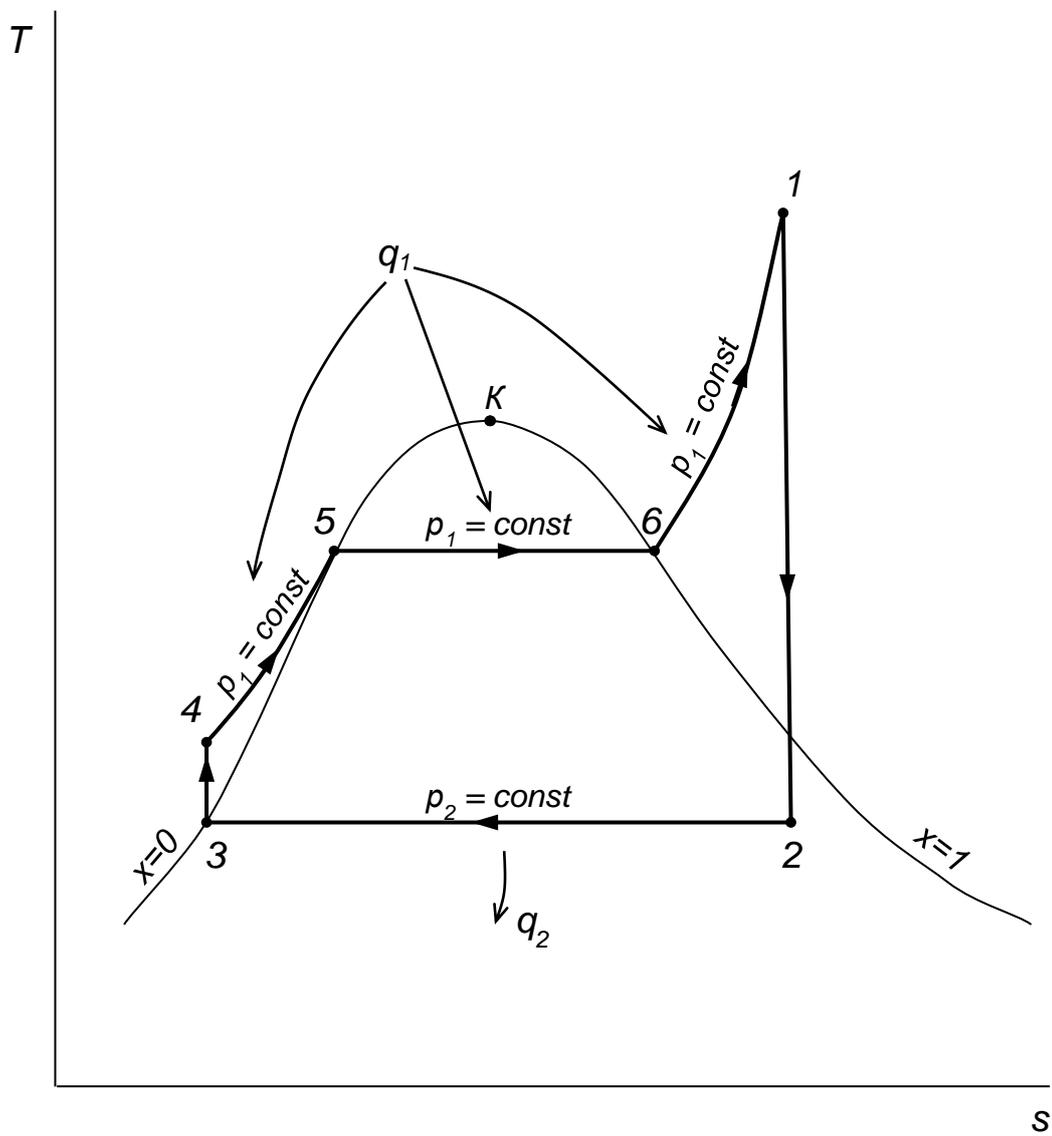
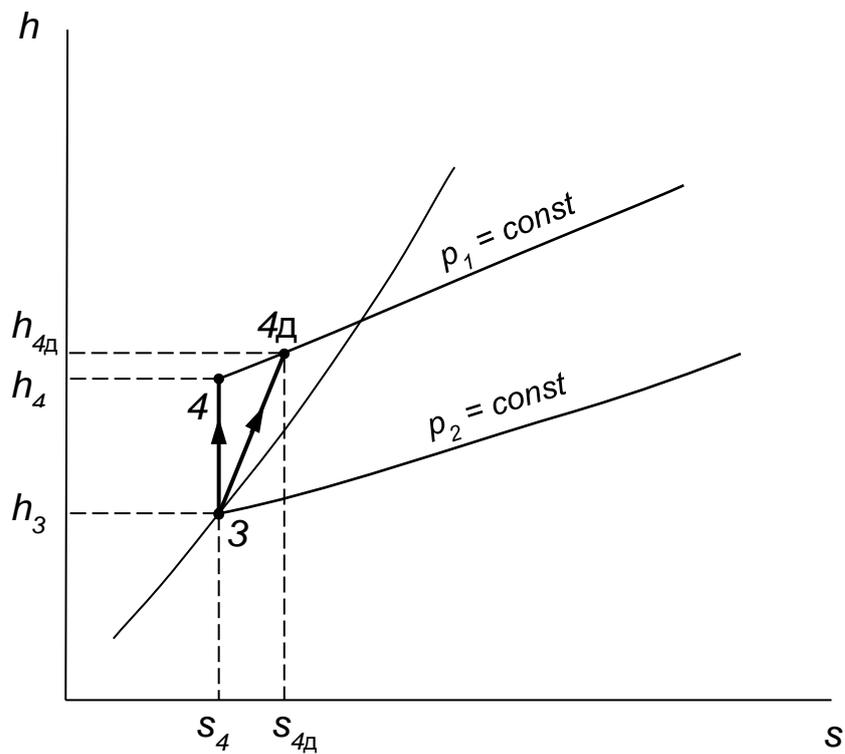
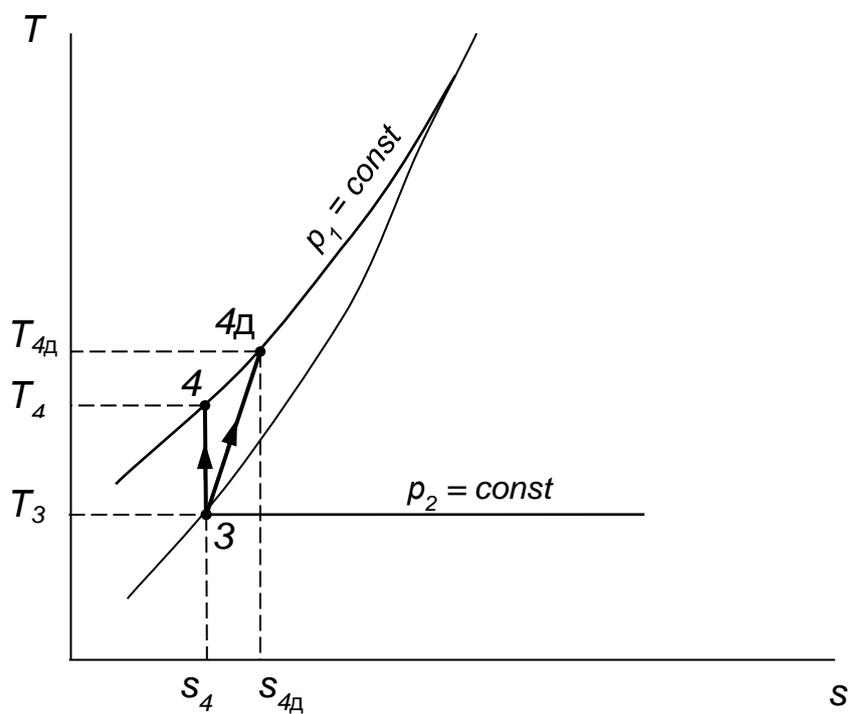


Рис. 2 – Изображение теоретического цикла Ренкина в диаграмме  $T-s$

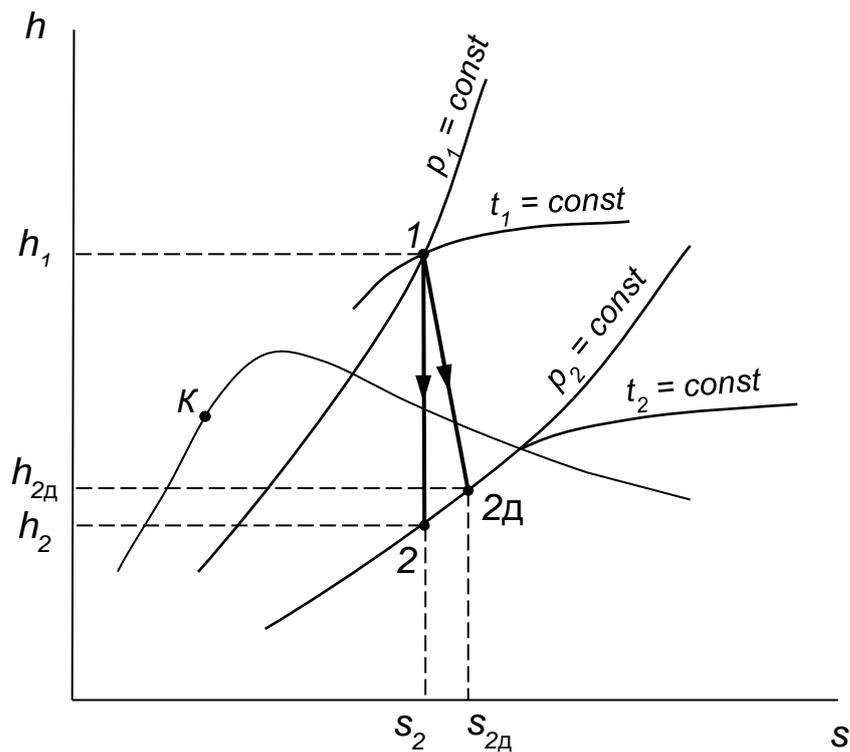


а)

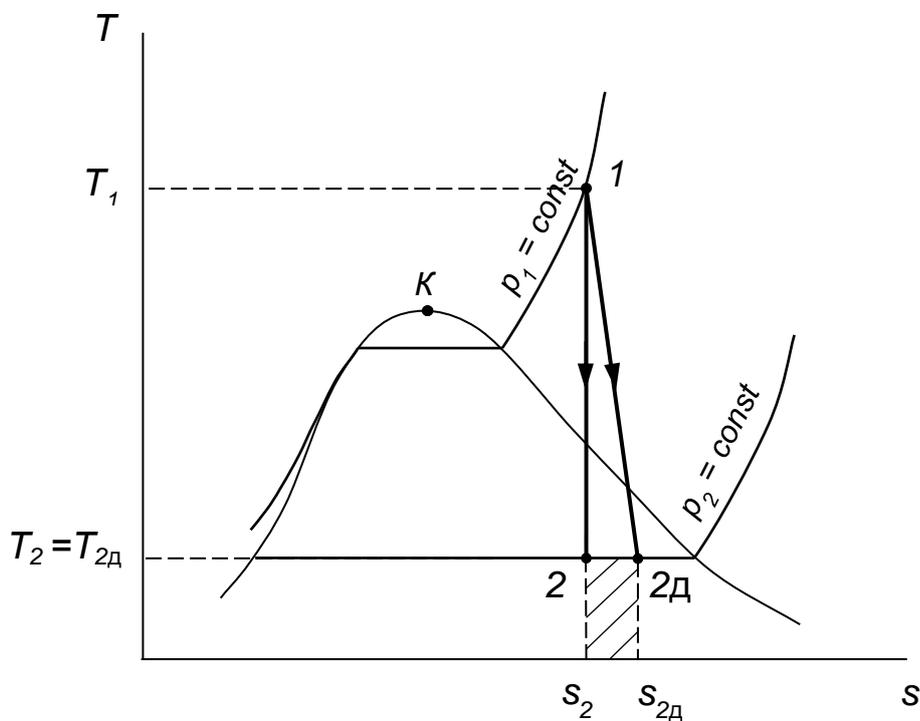


б)

Рис. 3 – Изображение теоретического и действительного процессов повышения давления воды в насосе в диаграммах  $h-s$  (а) и  $T-s$  (б)



a)



б)

Рис. 4 – Изображение теоретического и действительного процессов расширения пара в турбине в диаграммах  $h-s$  (а) и  $T-s$  (б)

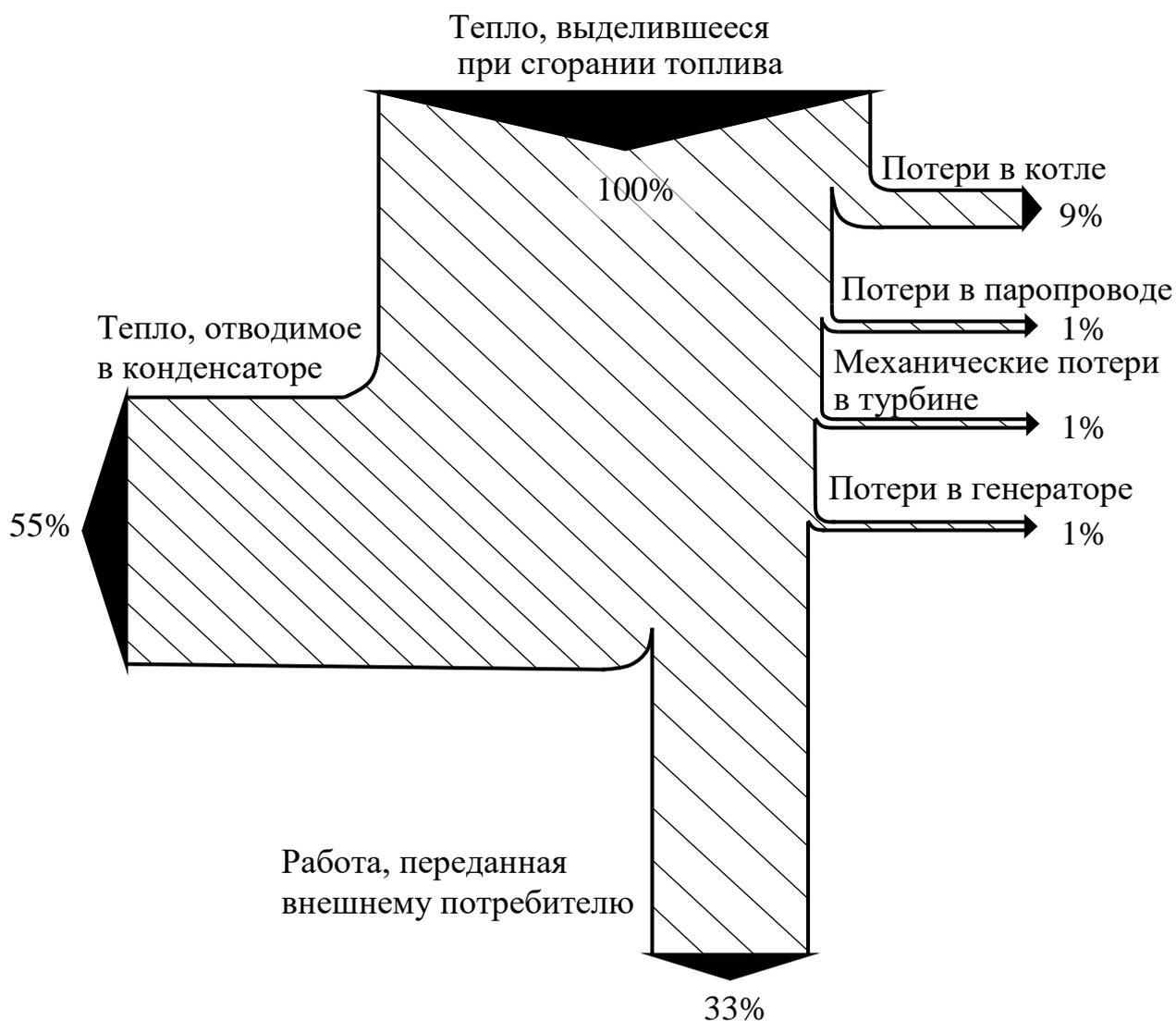


Рис. 5 – Диаграмма тепловых потоков, построенная на основании анализа необратимого цикла Ренкина методом коэффициентов полезного действия

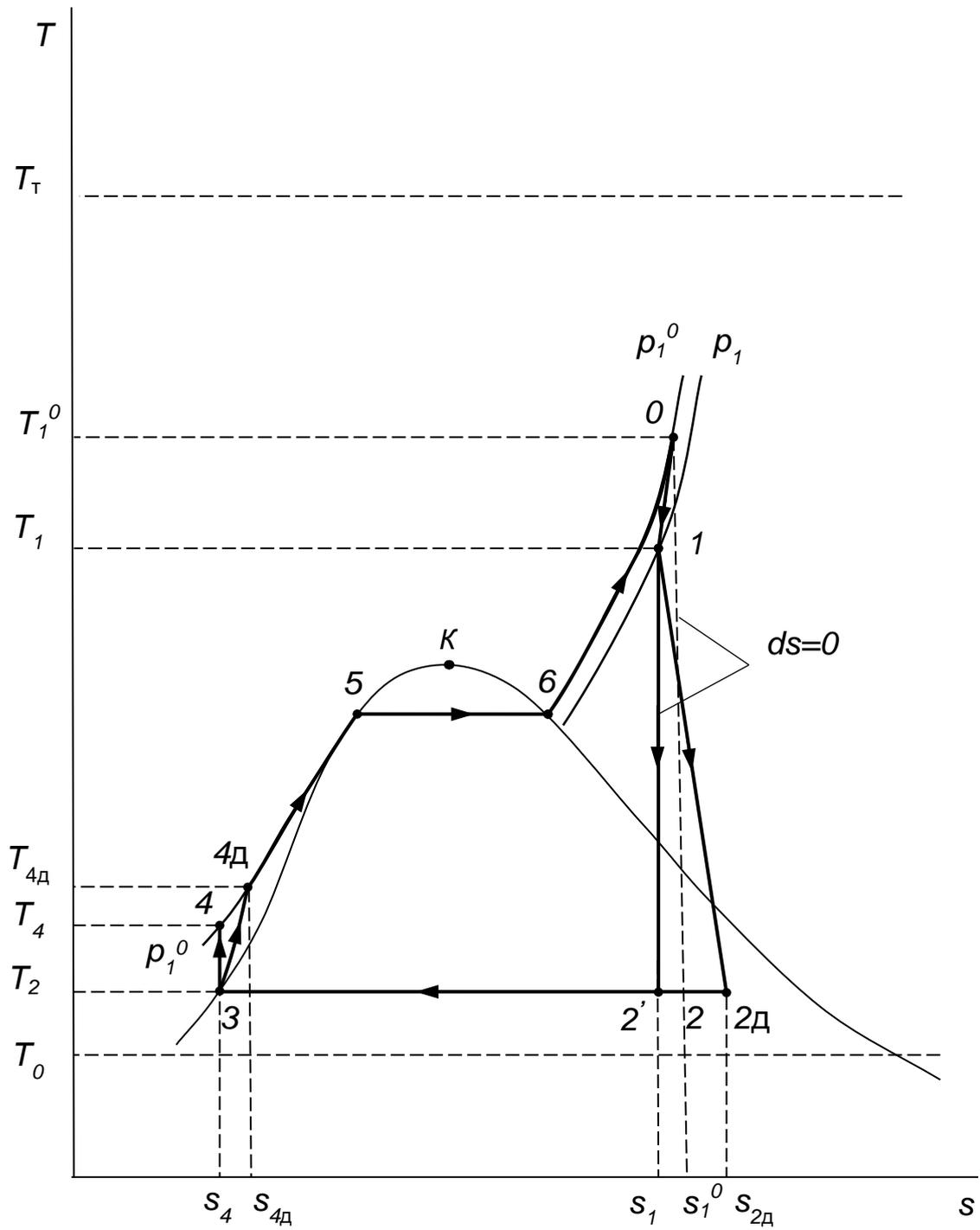


Рис. 6 – Изображение действительного цикла Ренкина в диаграмме  $T$ - $s$



Рис. 7 – Диаграмма потоков эксергии, построенная на основании анализа необратимого цикла Ренкина эксергетическим методом

*Учебное издание*

Виктор Васильевич Селин  
Елена Анатольевна Беркова

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

*Редактор*

Подписано в печать      г.  
Формат 60х90 1/16. Уч.-изд. л.    . Печ. л.    . Тираж 50 экз. Заказ №    .

Издательство федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»  
236022, Калининград, Советский проспект, 1