

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ПТУ

Методические указания и задания для выполнения
курсовой работы по дисциплине «Техническая термодинамика»

Иваново 2021

Составители И.М. ЧУХИН
 Д.В. РАКУТИНА

Редактор Е.Н. БУШУЕВ

Методические указания содержат порядок получения вариантов заданий, основные теоретические положения и требования к оформлению курсовой работы по расчету тепловой экономичности основных циклов паротурбинных установок (ПТУ). Задания включают пять основных циклов ПТУ: простой цикл, цикл ПТУ с вторичным пароперегревателем, регенеративный цикл, теплофикационный цикл, цикл ПТУ на насыщенном водяном паре для АЭС.

В методических указаниях приведены примеры заданий, графические изображения схем и циклов ПТУ в T,s - и h,s -диаграммах, последовательность расчета, методика проведения анализа их тепловой экономичности и список рекомендуемой литературы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» и 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», изучающих дисциплину «Техническая термодинамика. Часть 2».

Утверждены цикловой методической комиссией ТЭФ

Рецензент

кафедра теоретических основ теплотехники ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»

ВВЕДЕНИЕ

Курсовая работа представлена пятью заданиями, обязательными из которых являются первые три: расчет простого цикла ПТУ и его оптимизация, расчет цикла ПТУ с вторичным перегревом пара и его оптимизация, расчет регенеративного цикла ПТУ и его оптимизация. Остальные задания выдаются преподавателем, ведущим курс «Техническая термодинамика» для соответствующего направления подготовки студентов.

Основные теоретические положения по анализу тепловой экономичности циклов ПТУ и методики их расчета подробно изложены в [1, 2, 3]. Определение параметров воды и водяного пара в характерных точках циклов ПТУ выполняется по справочным таблицам их термодинамических свойств [4, 5, 6] (любой год издания) и по h,s - диаграмме термодинамических свойств водяного пара.

1. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОСТОГО ЦИКЛА ПТУ

Схема простого цикла паротурбинной установки (ПТУ) и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 1.1÷1.3.

Расчет включает два задания:

- задание 1.1 «Термодинамический расчет простого цикла ПТУ»;
- задание 1.2 «Оптимизация начального давления простого цикла ПТУ».

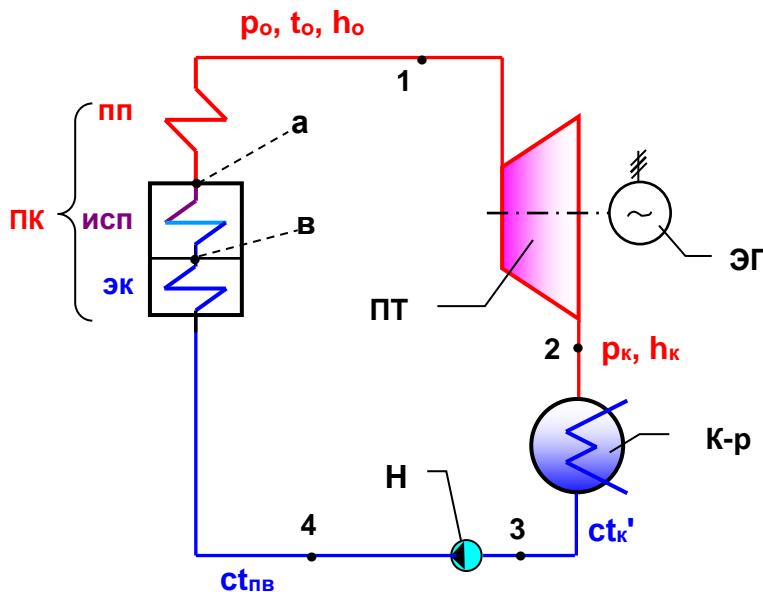


Рис. 1.1. Схема простой ПТУ: ПК – паровой котел; ПП – пароперегреватель; ИСП – испарительная поверхность; ЭК – экономайзер; ПТ – паровая турбина; К-р – конденсатор паровой турбины; Н – насос; ЭГ – электрический генератор

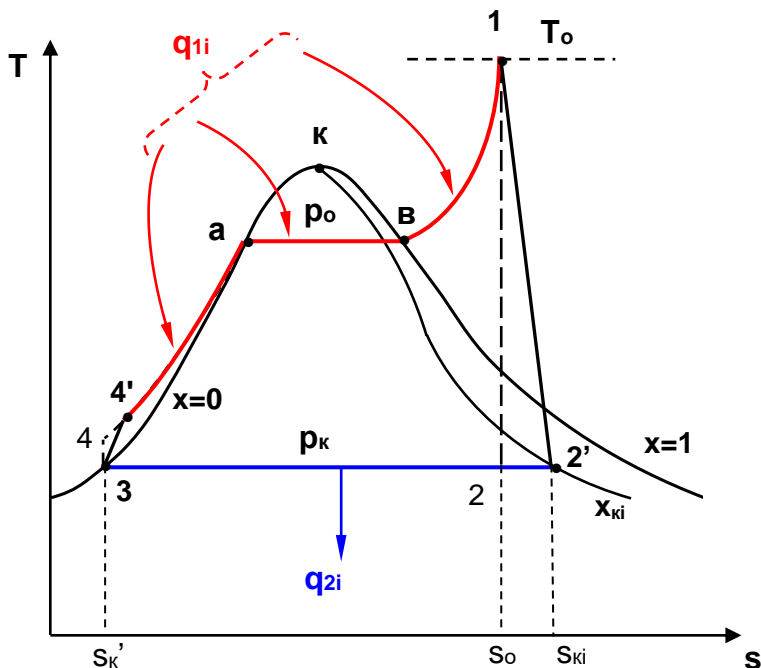


Рис. 1.2. Необратимый цикл простой ПТУ в T,s -диаграмме

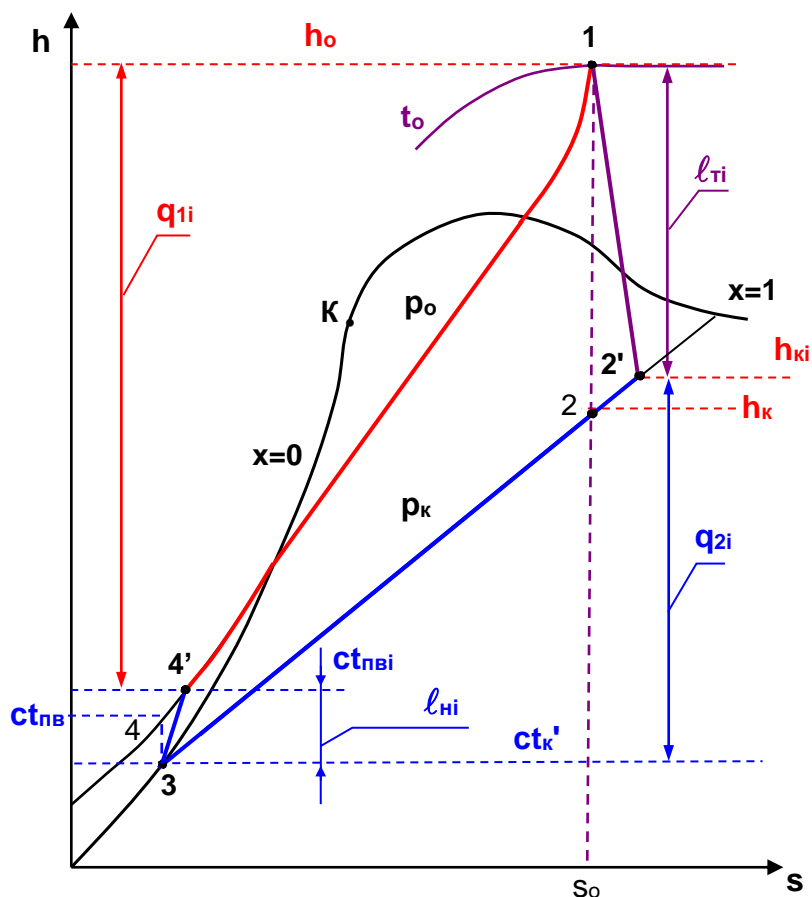


Рис. 1.3. Необратимый цикл простой ПТУ в h,s -диаграмме

1.1. Исходные данные и объем задания 1.1 «Термодинамический расчет простого цикла ПТУ»

Исходные данные:

p_o и t_o – давление и температура пара перед турбиной;

p_k – давление пара в конденсаторе турбины;

η_{oi} – внутренний относительный КПД турбины;

η_n – адиабатный коэффициент насоса;

η_m, η_r – механический КПД и КПД электрического генератора;

$Wэ$ – электрическая мощность ПТУ.

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся на сайте ИГЭУ (<http://ispu.ru/node/9840>) и в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Для получения задания необходимо ввести последние три цифры шифра (номера зачетной книжки) студента. *Обязательно при завершении ввода этих трех цифр выйдите из поля таблицы!* При-

мер исходных данных для расчета простого цикла ПТУ показан в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Пример исходных данных для расчета простого цикла ПТУ

Последние три цифры зачетной книжки			Простой цикл ПТУ					$W_{э},$ МВт
N_3	N_4	N_5	$p_o, \text{ МПа}$	$t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_k, \text{ МПа}$	η_{oi}	η_n	
0	0	0	10	505	0,0033	0,862	0,83	100

Для всех вариантов принять одинаковыми КПД механический и КПД генератора: $\eta_m=0,98$, $\eta_r=0,99$.

В пояснительной записке привести исходные данные и изобразить схему простой ПТУ и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах (аналогично рис. 1.1÷1.3).

Методика расчета простого цикла ПТУ подробно описана в разд. 1 методических указаний № 2266 [3].

Расчет цикла ПТУ выполнять в следующей последовательности:

1. Обратимый цикл ПТУ

По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии и степень сухости в характерных точках цикла:

h_o – энтальпия пара перед турбиной;

h_k, x_k – энтальпия и степень сухости пара на выходе из турбины;

ct'_k – энтальпия воды в состоянии насыщения на выходе из конденсатора;

$ct'_{пв}$ – энтальпия воды на выходе из насоса;

ct'_o – энтальпия воды в состоянии насыщения на выходе из экономайзера парового котла;

h_o'' – энтальпия сухого насыщенного пара на выходе из испарительной поверхности парового котла.

Далее рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *обратимого* цикла ПТУ [3]:

$q_{эк}, q_{исп}, q_{пп}$ – удельные величины теплоты, подведенной к рабочему телу в экономайзере, испарительной поверхности и пароперегревателе парового котла;

q_1 – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_2 – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

l_n – удельная техническая работа насоса;

l_t – удельная техническая работа турбины;

l_t – удельная работа обратимого цикла ПТУ;

η_t – термический КПД цикла ПТУ;

η_t^H – термический КПД нетто цикла ПТУ (без учета работы насоса);

d_t – удельный расход пара на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ;

q_t – удельный расход теплоты на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ.

2. Необратимый цикл ПТУ

Используя внутренний относительный КПД турбины η_{oi} и адиабатный коэффициент насоса η_n , определяют параметры в конце необратимых адиабатных процессов:

h_{ki}, x_{ki} – действительные энтальпия и степень сухости пара на выходе из турбины;

$ct_{пви}$ – действительная энтальпия воды на выходе из насоса.

Рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *необратимого* цикла ПТУ [3]:

q_{1i} – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_{2i} – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

l_{ni} – удельная техническая работа насоса;

l_{ti} – удельная техническая работа турбины;

l_i – удельная работа необратимого цикла ПТУ;

η_i – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ;

η_i^H – внутренний абсолютный КПД нетто цикла ПТУ (без учета работы насоса);

$\eta_{э}$ – электрический КПД цикла ПТУ;

$d_{э}$ – удельный расход пара на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

$q_{э}$ – удельный расход теплоты на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

D – расход пара на паровую турбину при ее заданной электрической мощности $W_{э}$.

Основные исходные данные и результаты термодинамического расчета простого обратимого и необратимого циклов ПТУ сводятся в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Результаты расчета простого цикла ПТУ

Исходные данные	p_o , МПа	t_o , °С	p_k , МПа	η_{oi}	η_n	η_m	η_r	$W_{э}$, МВт	
	Обратимый цикл	$\frac{q_1, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{q_2, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{т}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{н}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	η_t	η^H	$\frac{d_t, \text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{q_t, \text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$
Необратимый цикл	$\frac{q_{1i}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{q_{2i}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{тi}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{нi}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	η_i	$\eta_{э}$	$\frac{d_{э}, \text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{q_{э}, \text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{D, \text{кг}}{\text{с}}$

1.2. Исходные данные и объем задания 1.2

«Оптимизация начального давления простого цикла ПТУ»

Провести оптимизационный расчет простого цикла ПТУ. Схема простой ПТУ и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 1.1÷1.3.

Исходные данные для оптимизационного расчета простого цикла ПТУ аналогичны заданию 1.1. При этом считаем, что давление пара перед турбиной p_o не задано, его определяем методом вариативных расчетов.

Первоначально рассчитывают термические КПД η_t при семи или более значениях p_o в диапазоне от $p_o = p_k$ до $p_o = p_o^{\max}$ с равным интервалом между давлениями. Значения давлений p_o необходимо округлять до ближайших табличных значений. Расчет выполняют для простого обратимого цикла ПТУ по методике, описанной в разд. 1 методических указаний № 2266 [3], и повторяют до выявления p_o , соответствующего максимальному значению термического КПД η_t^{\max} . Рекомендуется принять $p_o^{\max} = 50$ МПа.

Результаты оптимизационного расчета представляют в виде табл. 1.3. Подробное описание определения параметров и расчета величин, приведенных в табл. 1.3 не требуется.

Таблица 1.3. Результаты оптимизационного расчета простого цикла ПТУ

p_o , МПа	h_o , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	s_o , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	h_k , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$ct_{пв}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	l_t , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	q_1 , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	q_2 , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	η_t	x_k
$p_{o1}=p_k$					0			0	-
p_{o2}									
...									
...									
$p_o^{\text{опт}}$								$\eta_t^{\text{опт}}$	0,88
...									
$p_{oN}=p_o^{\text{max}}$									

$$t_o = \quad \text{°C}, \quad ct_k' = \quad \text{кДж/кг}$$

По данным табл. 1.3 в масштабе строят график (рис. 1.4) зависимости $\eta_t = f(p_o)$. На этом графике отмечают точки с максимальным значением КПД η_t^{max} и оптимальным КПД $\eta_t^{\text{опт}}$ с учетом допустимого значения конечной степени сухости пара на выходе из турбины $x_{\text{кдоп}}=0,88$. Оптимальное значение давления пара перед турбиной $p_o^{\text{опт}}$ соответствует значению $\eta_t^{\text{опт}}$. При этом значении давления $p_o^{\text{опт}}$ выполняют расчет простого цикла ПТУ. Последовательность расчета аналогична заданию 1.1. Результаты этого расчета сводят в таблицу, аналогичную табл. 1.2.

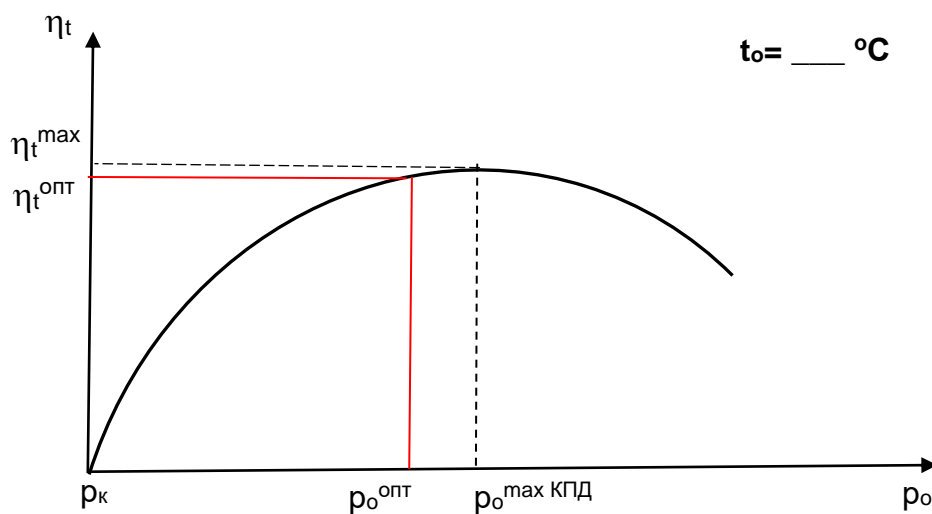


Рис. 1.4. Зависимость термического КПД цикла ПТУ от начального давления при температуре пара перед турбиной t_o

2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛА ПТУ С ВТОРИЧНЫМ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕМ

Схема ПТУ с вторичным пароперегревателем (ВПП) и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 2.1÷2.3.

Расчет включает два задания:

- задание 2.1 «Термодинамический расчет цикла ПТУ с ВПП»;
- задание 2.2 «Оптимизация давления вторичного перегрева пара для цикла ПТУ с ВПП».

2.1. Исходные данные и объем задания 2.1 «Термодинамический расчет цикла ПТУ с ВПП»

Исходные данные:

$p_o, t_o, p_k, \eta_n, \eta_m, \eta_r, Wэ$ – такие же, как в задании 1.1;

$p_{вп}$ – давление пара во вторичном пароперегревателе;

$t_{вп}$ – температура пара на выходе из вторичного пароперегревателя;

$\eta_{oi}^{ЧВД}$ – внутренний относительный КПД части высокого давления турбины (ЧВД);

$\eta_{oi}^{ЧНД}$ – внутренний относительный КПД части низкого давления турбины (ЧНД).

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся на сайте ИГЭУ (<http://ispu.ru/node/9840>) и в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Для получения задания необходимо ввести последние три цифры шифра (номера зачетной книжки) студента. *Обязательно при завершении ввода этих трех цифр выйдите из поля таблицы!* Пример исходных данных для расчета цикла ПТУ с ВПП показан в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Пример исходных данных для расчета цикла ПТУ с ВПП

Последние три цифры зачетной книжки			Цикл ПТУ с ВПП				
N ₃	N ₄	N ₅	$t_{вп} = t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_{вп}, \text{ МПа}$	$\eta_{oi}^{ЧВД}$	$\eta_{oi}^{ЧНД}$	η_n
0	0	0	505	3	0,852	0,862	0,83

Для всех вариантов принять одинаковыми КПД механический и КПД генератора: $\eta_m=0,98, \eta_r=0,99$.

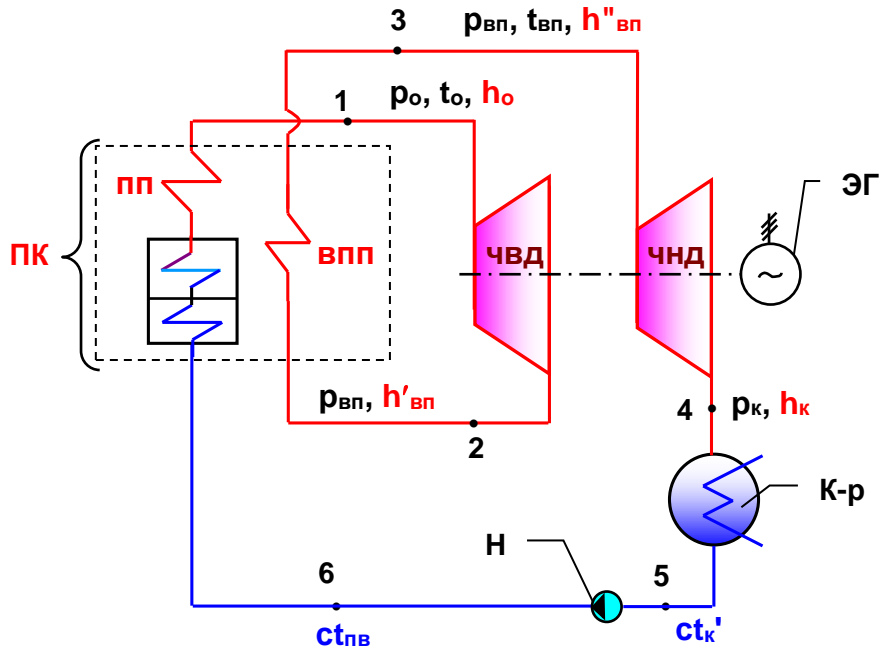


Рис. 2.1. Схема паротурбинной установки с вторичным пароперегревателем: ПК – паровой котел; ПП – первичный пароперегреватель; ВПП – вторичный пароперегреватель; ЧВД, ЧНД – части высокого и низкого давления турбины; К-р – конденсатор паровой турбины; Н – насос; ЭГ – электрический генератор

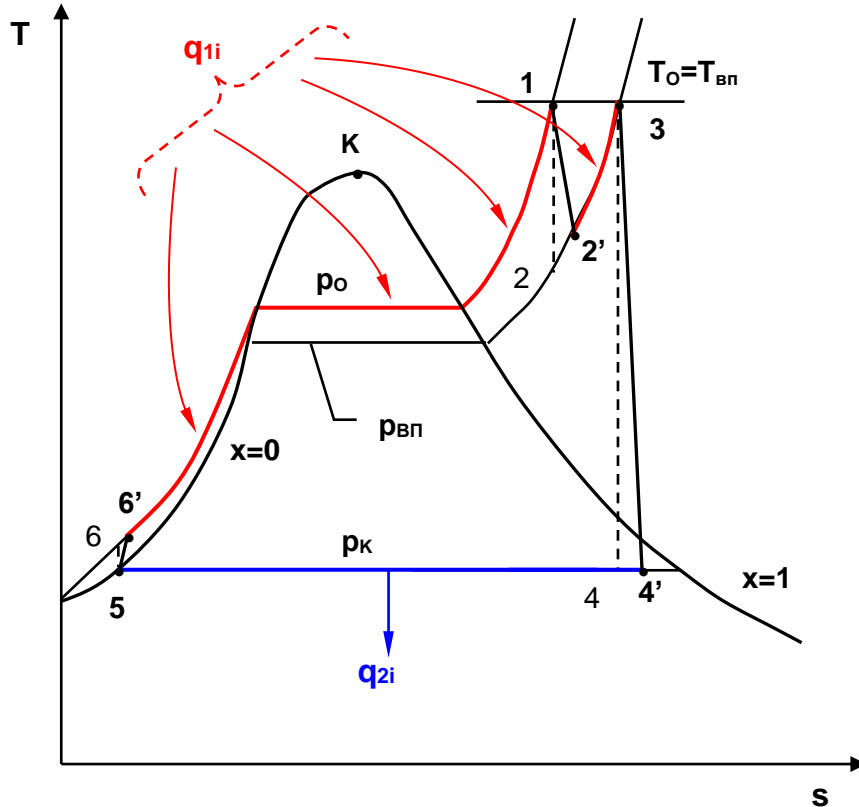


Рис. 2.2. Необратимый цикл ПТУ с вторичным перегревом пара в T,s-диаграмме

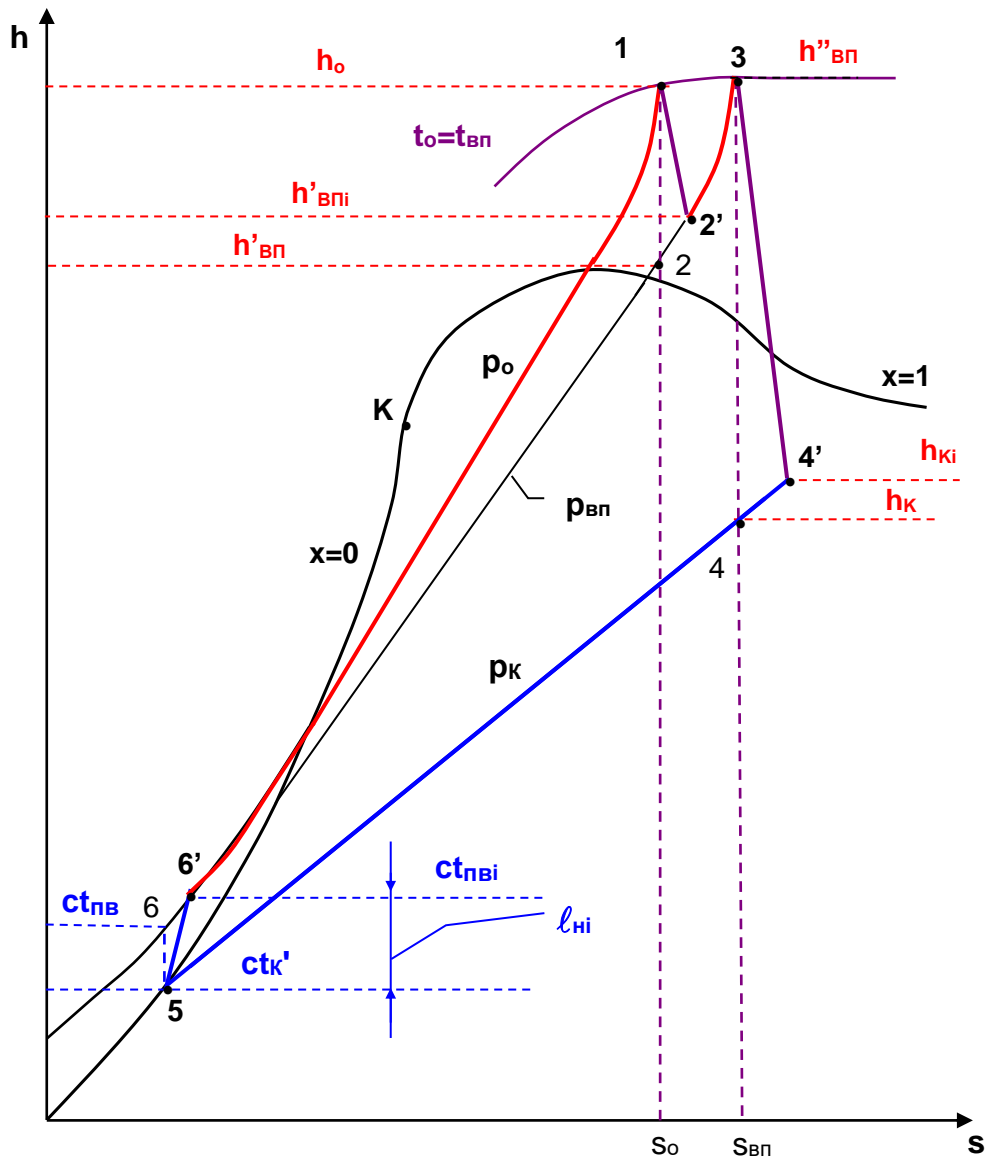


Рис. 2.3. Необратимый цикл ПТУ с вторичным перегревом пара в h,s -диаграмме

В пояснительной записке привести исходные данные и изобразить схему ПТУ с ВПП и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах (рис. 2.1÷2.3).

Методика расчета цикла ПТУ с ВПП подробно описана в разд. 2 методических указаний № 2266 [3].

Расчет цикла ПТУ выполнять в следующей последовательности:

1. Обратимый цикл ПТУ с ВПП

По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии и степень сухости в характерных точках цикла:

$h_о$, $c_{тк'}$, $c_{тпв}$ имеют такие же значения, как для простого цикла ПТУ (см. задание 1.1);

$h_к$, $x_к$ – энтальпия и степень сухости пара на выходе из турбины;

$h'_{вп}, h''_{вп}$ – энтальпия пара на входе и выходе из ВПП.

Далее рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *обратимого* цикла ПТУ с ВПП [3]:

q_1 – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_2 – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

l_n – удельная техническая работа насоса;

l_t – удельная техническая работа турбины;

$l_{\text{т}}$ – удельная работа обратимого цикла ПТУ;

η_t – термический КПД цикла ПТУ;

$\eta_t^{\text{н}}$ – термический КПД нетто цикла ПТУ (*без учета работы насоса*);

d_t – удельный расход пара на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ;

q_t – удельный расход теплоты на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ.

2. Необратимый цикл ПТУ с ВПП

Используя внутренние относительные КПД турбины $\eta_{oi}^{\text{ЧВД}}$ и $\eta_{oi}^{\text{ЧНД}}$, адиабатный коэффициент насоса η_n , определяют параметры в конце необратимых адиабатных процессов:

$h'_{впi}$ – действительная энтальпия пара на входе во вторичный пароперегреватель;

h_{ki}, x_{ki} – действительные энтальпия и степень сухости пара на выходе из части низкого давления турбины;

$st_{пви}$ – действительная энтальпия воды на выходе из насоса.

Рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *необратимого* цикла ПТУ с ВПП [3]:

q_{1i} – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_{2i} – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

l_{ni} – удельная техническая работа насоса;

l_{ti} – удельная техническая работа турбины;

l_i – удельная работа необратимого цикла ПТУ;

η_i – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ;

$\eta_i^{\text{н}}$ – внутренний абсолютный КПД нетто цикла ПТУ (*без учета работы насоса*);

$\eta_{\text{э}}$ – электрический КПД цикла ПТУ;

$d_{\text{э}}$ – удельный расход пара на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

$q_{\text{э}}$ – удельный расход теплоты на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

D – расход пара на паровую турбину при ее заданной электрической мощности $W_{\text{э}}$.

Основные исходные данные и результаты термодинамического расчета обратимого и необратимого циклов ПТУ с вторичным перегревом пара сводятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Результаты расчета цикла ПТУ с ВПП

Исходные данные	p_0 , МПа	$t_0 = t_{\text{вп}}$, °С	$p_{\text{вп}}$, МПа	$p_{\text{к}}$, МПа	$\eta_{\text{м}}$	$\eta_{\text{г}}$	$\eta_{\text{oi}^{\text{чвд}}}$	$\eta_{\text{oi}^{\text{чнд}}}$	$W_{\text{э}}$, МВт
	Обратимый цикл	$\frac{q_1, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{q_2, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{\text{т}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{\text{н}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\eta_{\text{т}}$	$\eta_{\text{т}^{\text{н}}}$	$\frac{d_{\text{т}}, \text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{q_{\text{т}}, \text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$
Необратимый цикл	$\frac{q_{1\text{i}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{q_{2\text{i}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{\text{тi}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{\text{ни}}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	η_{i}	$\eta_{\text{э}}$	$\frac{d_{\text{э}}, \text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{q_{\text{э}}, \text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{D, \text{кг}}{\text{с}}$

2.2. Исходные данные и объем задания 2.2 «Оптимизация давления вторичного перегрева пара для цикла ПТУ с ВПП»

Провести оптимизационный расчет цикла ПТУ с вторичным пароперегревателем (ВПП). Схема ПТУ с вторичным пароперегревателем и ее цикл в T, s - и h, s -диаграммах представлены на рис. 2.1÷2.3.

Исходные данные для оптимизационного расчета цикла ПТУ с вторичным пароперегревателем аналогичны заданию 2.1. При этом считаем, что давление вторичного перегрева $p_{\text{вп}}$ не задано, его определяем методом вариативных расчетов.

Первоначально рассчитывают термические КПД $\eta_{\text{т}}$ при семи или более значениях $p_{\text{вп}}$ в диапазоне от $p_{\text{вп}} = p_{\text{к}}$ до $p_{\text{вп}} = p_0$ с равным интервалом между давлениями. Значения давлений $p_{\text{вп}}$ необходимо округлять до ближайших табличных значений. Расчет выполняют

для обратимого цикла ПТУ с ВПП по методике, описанной в разд. 2 методических указаний № 2266 [3]. Результаты оптимизационного расчета представляют в виде табл. 2.3. Подробное описание определения параметров и расчета величин, приведенных в табл. 2.3 не требуется.

Таблица 2.3. Результаты оптимизационного расчета цикла ПТУ с ВПП

$p_{вп},$ МПа	$\frac{h'_{вп},}{кДж}$ кг	$\frac{S_{вп},}{кДж}$ кг · К	$\frac{h''_{вп},}{кДж}$ кг	$\frac{h_k,}{кДж}$ кг	x_k	$\frac{q_1,}{кДж}$ кг	$\frac{q_2,}{кДж}$ кг	η_t
$p_{вп1}=p_k$								
$p_{вп2}$								
...								
$p_{впN}=p_o$								

$h_o = \underline{\hspace{2cm}}$ кДж/кг; $s_o = \underline{\hspace{2cm}}$ кДж/(кг·К); $ct_k' = \underline{\hspace{2cm}}$ кДж/кг; $ct_{пв} = \underline{\hspace{2cm}}$ кДж/кг

По данным табл. 2.3 в масштабе строят график (рис. 2.4) зависимости $\eta_t = f(p_{вп})$. Оптимальное значение давления вторичного перегрева пара $p_{вп}^{опт}$ определяют по максимальному значению $\eta_{tmax}^{вп}$. При этом значении давления $p_{вп}^{опт}$ выполняют расчет цикла ПТУ с ВПП. Последовательность расчета аналогична заданию 2.1. Результаты этого расчета сводят в таблицу, аналогичную табл. 2.2.

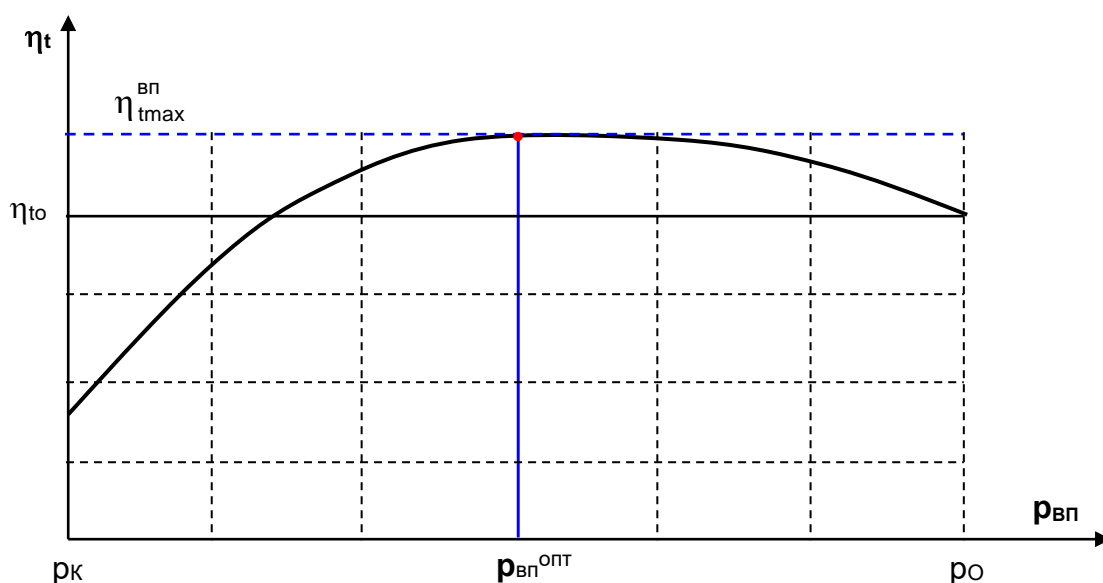


Рис. 2.4. Зависимость термического КПД ПТУ от давления вторичного перегрева: η_{to} – КПД цикла без вторичного перегрева пара; $\eta_{tmax}^{вп}$ – максимальное значение КПД при давлении вторичного перегрева $p_{вп}^{опт}$

Пояснение к расчету КПД ПТУ с ВПП при $p_{вп}=p_k$ и $p_{вп}=p_o$

При $p_{вп}=p_k$ цикл ПТУ с вторичным перегревом пара в h,s -диаграмме будет иметь вид, соответствующий рис. 2.5.

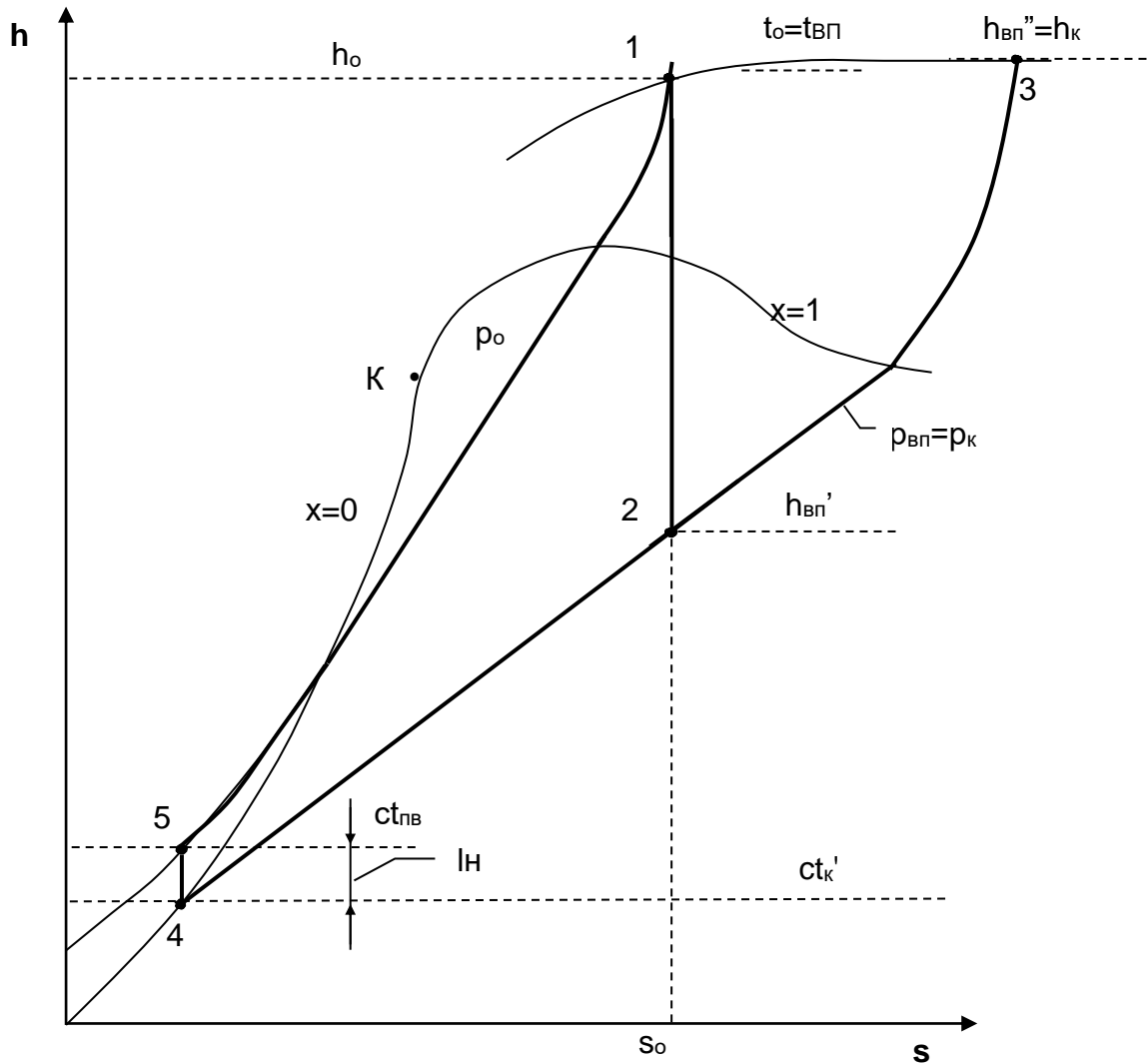


Рис. 2.5. Обратимый цикл ПТУ с вторичным перегревом пара в h,s - диаграмме при $p_{вп}=p_k$

В случае $p_{вп} = p_k$ будут следующие расчетные выражения основных показателей тепловой экономичности ПТУ с ВПП:

$$q_1 = h_o - ct_{пв} + h_{вп}'' - h_{вп}'; \quad q_2 = h_{вп}'' - ct_{к'}, \quad (2.1)$$

$$l_T = h_o - h_{вп}', \quad (2.2)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}. \quad (2.3)$$

При $p_{вп} = p_o$ цикл ПТУ с вторичным перегревом пара будет такой же, как и цикл ПТУ без вторичного перегрева пара. Соответственно и КПД в этом случае у него будет такой же, как у простого цикла ПТУ: $\eta_t^{вп} = \eta_{to}$.

3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЦИКЛА ПТУ

Схема регенеративной ПТУ с двумя смешивающими подогревателями ($n = 2$) и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 3.1÷3.3.

Схема регенеративной ПТУ с тремя смешивающими подогревателями ($n = 3$) приведена в разд. 3 методических указаний № 2266 [3].

Расчет включает два задания:

- задание 3.1 «Термодинамический расчет регенеративного цикла ПТУ»;
- задание 3.2 «Оптимизация давления отбора пара цикла ПТУ с одним регенеративным смешивающим подогревателем».

3.1. Исходные данные и объем задания 3.1 «Термодинамический расчет регенеративного цикла ПТУ»

Исходные данные:

$p_o, t_o, p_k, \eta_m, \eta_r, W_{э}$ – такие же, как в задании 1.1;

η_{oi} – внутренний относительный КПД турбины;

n – число регенеративных подогревателей.

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся на сайте ИГЭУ (<http://ispu.ru/node/9840>) и в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Для получения задания необходимо ввести последние три цифры шифра (номера зачетной книжки) студента. *Обязательно при завершении ввода этих трех цифр выйдите из поля таблицы!* Пример исходных данных для расчета регенеративного цикла ПТУ показан в табл. 3.1.

Таблица 3.1. **Пример исходных данных для расчета регенеративного цикла ПТУ**

Последние три цифры зачетной книжки			Регенеративный цикл ПТУ	
N_3	N_4	N_5	n	η_{oi}
0	0	0	2	0,862

Для всех вариантов принять одинаковыми КПД механический и КПД генератора: $\eta_m=0,98, \eta_r=0,99$.

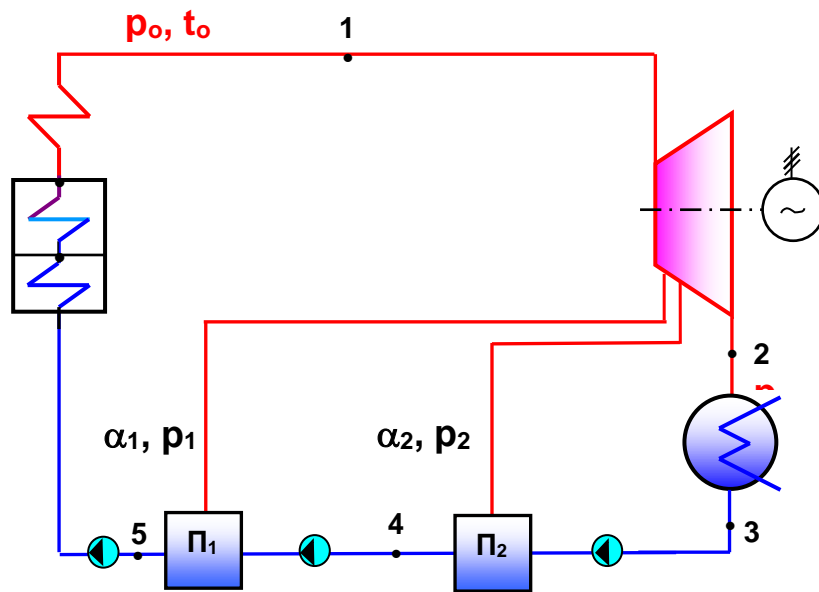


Рис. 3.1. Схема регенеративной ПТУ с двумя смешивающими регенеративными подогревателями Π_1, Π_2

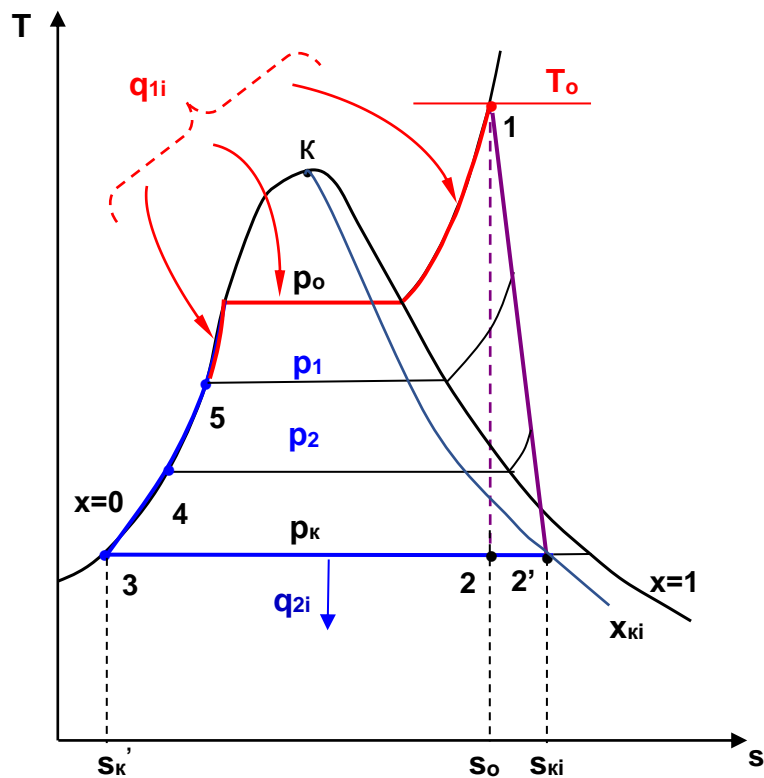


Рис. 3.2. Необратимый цикл ПТУ с двумя смешивающими регенеративными подогревателями в T, s - диаграмме (без учета работы насосов)

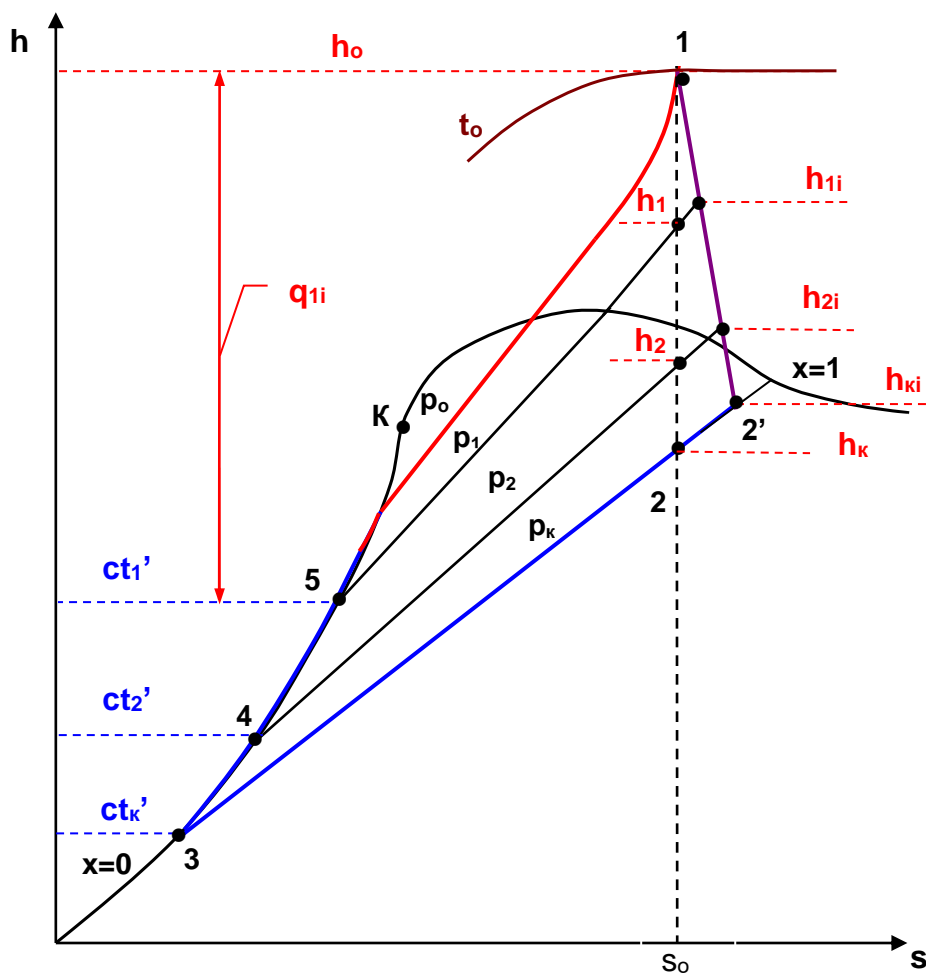


Рис. 3.3. Необратимый цикл ПТУ с двумя смешивающими регенеративными подогревателями в h,s - диаграмме (без учета работы насосов)

В пояснительной записке привести исходные данные и изобразить схему регенеративной ПТУ и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах (аналогично рис. 3.1÷3.3).

Давления отборов пара из турбины на подогреватели выбираются исходя из принципа равномерного подогрева воды в подогревателях и экономайзере ПТУ. Методика расчета регенеративного цикла ПТУ подробно описана в разд. 3 методических указаний № 2266 [3].

Расчеты выполняются без учета работы насосов, поэтому в задании адиабатный коэффициент насоса η_n отсутствует.

Расчет цикла ПТУ с количеством регенеративных подогревателей $n = 2$ ($n = 3$) выполнять в следующей последовательности:

1. Обратимый регенеративный цикл ПТУ

Определяют давления отборов пара из турбины на регенеративные подогреватели $p_1, p_2, (p_3)$, используя принцип равномерного подогрева воды в подогревателях и экономайзере [3].

По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии и степень сухости в характерных точках цикла:

h_o, h_k, x_k, ct_k' имеют такие же значения, как для простого цикла ПТУ (см. задание №1);

$h_1, h_2, (h_3)$ – энтальпии отборов пара из турбины на регенеративные подогреватели;

$ct_1', ct_2', (ct_3')$ – энтальпии воды на выходе из первого, второго (третьего) регенеративного подогревателя соответственно.

Из уравнения смешения пара и воды в потоке, составленного для каждого регенеративного подогревателя, определяют доли отборов пара из турбины $\alpha_1, \alpha_2, (\alpha_3)$ [3].

Далее рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *обратимого* регенеративного цикла ПТУ:

q_1 – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_2 – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

$\ell_T = \ell_t$ – удельная техническая работа турбины, равная удельной работе обратимого цикла ПТУ, т.к. $\ell_H = 0$;

η_t – термический КПД цикла ПТУ;

d_t – удельный расход пара на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ;

q_t – удельный расход теплоты на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ.

2. Необратимый регенеративный цикл ПТУ

Используя внутренний относительный КПД турбины η_{oi} определяют параметры пара для необратимого адиабатного процесса:

$h_{1i}, h_{2i}, (h_{3i})$ – действительные энтальпии отборов пара из турбины на регенеративные подогреватели;

h_{ki}, x_{ki} – действительные энтальпия и степень сухости пара на выходе из турбины.

С учетом действительных параметров пара рассчитывают доли отборов пара на регенеративные подогреватели $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, (\alpha_{3i})$ [3].

Определяют величины, используемые при оценке тепловой экономичности *необратимого* регенеративного цикла ПТУ [3]:

q_{1i} – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_{2i} – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

$\ell_{Ti} = \ell_i$ – удельная техническая работа турбины, равная удельной

работе необратимого цикла ПТУ;

η_i – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ;

$\eta_{\text{э}}$ – электрический КПД цикла ПТУ;

$d_{\text{э}}$ – удельный расход пара на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

$q_{\text{э}}$ – удельный расход теплоты на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

D – расход пара на паровую турбину при ее заданной электрической мощности $W_{\text{э}}$.

Основные исходные данные и результаты термодинамического расчета обратимого и необратимого регенеративного циклов ПТУ сводятся в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Результаты расчета регенеративного цикла ПТУ

Исходные данные	p_0 , МПа	t_0 , °С	p_k , МПа	n	η_{oi}	η_m	η_r	$W_{\text{э}}$, МВт			
Обратимый цикл	$\frac{q_1, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{q_2, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_t, \text{кДж}}{\text{кг}}$	α_1	α_2	α_3	η_t	$\frac{d_t, \text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{q_t, \text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$		
Необратимый цикл	$\frac{q_{1i}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{q_{2i}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{l_{ti}, \text{кДж}}{\text{кг}}$	α_{1i}	α_{2i}	α_{3i}	η_i	$\frac{d_{\text{э}}, \text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\frac{q_{\text{э}}, \text{кДж}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$	$\eta_{\text{э}}$	$\frac{D, \text{кг}}{\text{с}}$

3.2. Исходные данные и объем задания 3.2

«Оптимизация давления отбора пара цикла ПТУ

с одним регенеративным смешивающим подогревателем»

Провести термодинамический расчет регенеративного цикла ПТУ с одним смешивающим регенеративным подогревателем и оптимизацией давления отбора пара из турбины на этот подогреватель.

Схема ПТУ с одним смешивающим регенеративным подогревателем ($n=1$) и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 3.4÷3.6.

Исходные данные:

$p_o, t_o, p_k, \eta_{oi}, \eta_m, \eta_g, W_{э}$ – такие же, как в задании 1.1;

$n = 1$ – число регенеративных подогревателей.

Расчет регенеративной ПТУ выполняют без учета работы насосов, поэтому в задании адиабатный коэффициент насоса η_n отсутствует.

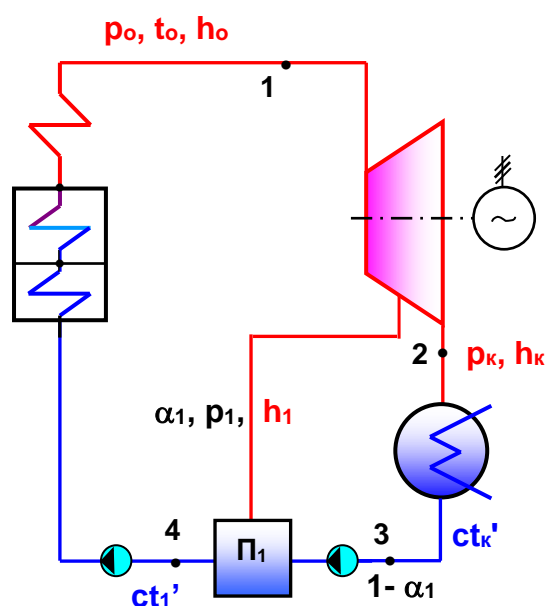


Рис. 3.4. Схема регенеративной ПТУ с одним смешивающим подогревателем

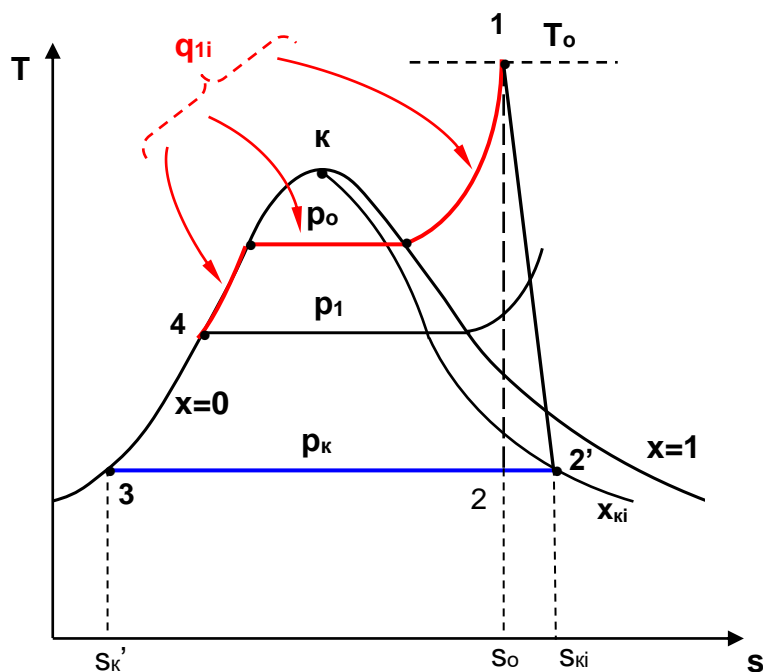


Рис. 3.5. Необратимый цикл ПТУ с одним смешивающим подогревателем в T,s -диаграмме (без учета работы насосов)

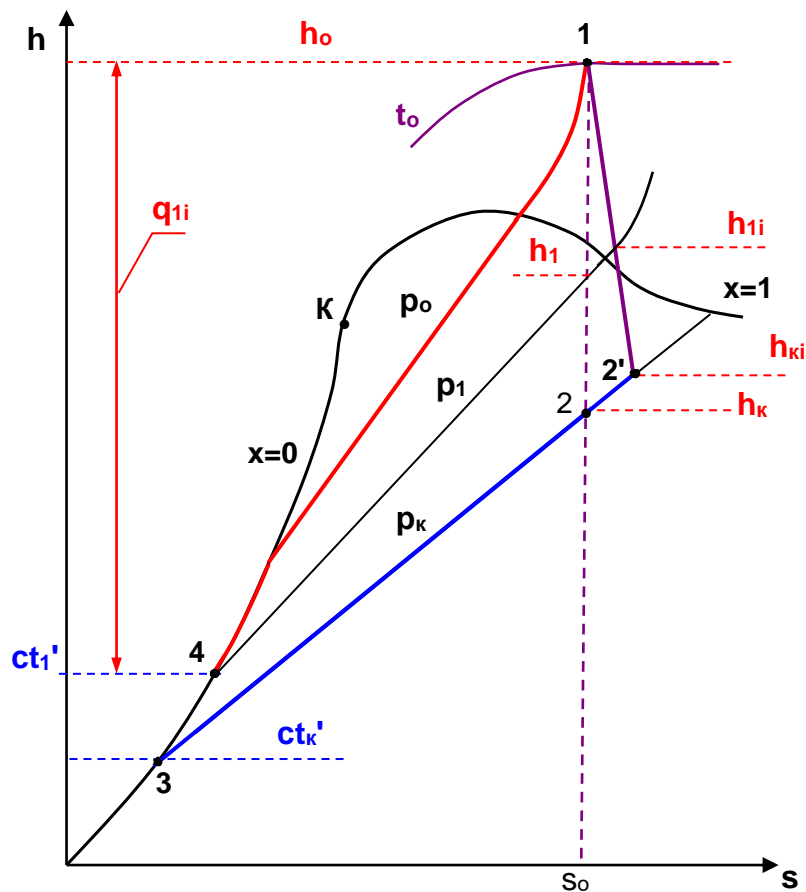


Рис. 3.6. Необратимый цикл ПТУ с одним смешивающим подогревателем в h,s -диаграмме (без учета работы насосов)

При $n=1$ оптимальное давление отбора пара из турбины на смешивающий подогреватель p_1 выбирается путем вариантных расчетов. Для этого рассчитывают термические КПД η_t при семи или более значениях температуры питательной воды $t_{пв} = t_1^H$ в диапазоне от $t_1^H = t_o^H$ до $t_1^H = t_k^H$. Интервал между этими температурами определяют по формуле

$$\Delta t_1 = \frac{t_o^H - t_k^H}{N - 1}, \quad (3.1)$$

где t_o^H – температура насыщения при давлении p_o ;
 t_k^H – температура насыщения при давлении p_k ;
 N – количество расчетных вариантов (принимают самостоятельно, но не менее 7).

Температуру питательной воды находят как

$$t_{1i}^H = t_k^H + (i - 1) \cdot \Delta t_1, \quad (3.2)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – номер варианта расчета.

Одно из значений температуры питательной воды обязательно должно соответствовать середине всего температурного интервала

$$t_1^H = t_o^H - \frac{t_o^H - t_k^H}{2}. \quad (3.3)$$

Далее рассчитывают термические КПД η_t обратимого регенеративного цикла ПТУ с $n = 1$. Расчет выполняют в следующей последовательности:

1) Задают количество расчетных вариантов N и по формулам (3.1) ÷ (3.3) определяют температуры питательной воды t_{1i}^H в диапазоне от t_o^H до t_k^H .

2) Для каждого варианта определяют давление отбора пара из турбины на регенеративный подогреватель p_{1i} , которое соответствует давлению насыщения при данной температуре t_{1i}^H .

3) По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии и степень сухости в характерных точках цикла:

h_o, h_k, x_k, ct_k' имеют такие же значения, как для простого цикла ПТУ (см. задание 1.1);

h_1 – энтальпию отбора пара из турбины на регенеративный подогреватель определяют по давлению p_{1i} и энтропии s_o ;

ct_1' – энтальпию воды на выходе из регенеративного подогревателя Π_1 находят при давлении p_{1i} и степени сухости $x = 0$.

4) Составляют уравнение смешения пара и воды в потоке для регенеративного подогревателя Π_1 (рис. 3.7) и определяют долю отбора пара из турбины α_1 .

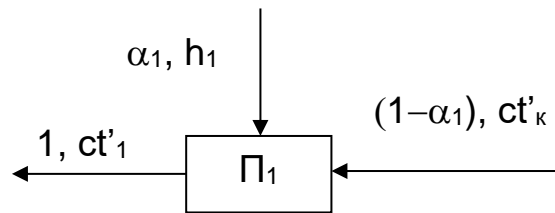


Рис. 3.7. Схема потоков подогревателя Π_1

$$ct_1' = \alpha_1 \cdot h_1 + (1 - \alpha_1) \cdot ct_k' \quad \rightarrow \quad \alpha_1 = \frac{ct_1' - ct_k'}{h_1 - ct_k'}. \quad (3.4)$$

5) Рассчитывают удельную теплоту, подведенную к рабочему телу в цикле

$$q_1 = h_o - ct_1'. \quad (3.5)$$

6) Удельная техническая работа турбины равна удельной работе обратимого цикла ПТУ, т.к. $l_n = 0$:

$$l_T = l_t = h_o - h_1 + (1 - \alpha_1)(h_1 - h_k). \quad (3.6)$$

7) Находят термический КПД цикла ПТУ:

$$\eta_t = \frac{\ell_t}{q_1}. \quad (3.7)$$

Расчет повторяют с пункта 3 для каждого значения давления отбора пара p_{1i} . Результаты расчета представляют в виде табл. 3.3. Подробное описание определения параметров и расчета величин, приведенных в табл. 3.3 не требуется.

Таблица 3.3. Результаты оптимизационного расчета регенеративного цикла ПТУ с $n=1$

t_{1i}^H	$p_{1i},$ МПа	$h_1,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$ct'_1,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	α_1	$q_1,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\ell_t,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	η_t
$t_{11}^H=t_k^H$				0			η_{to}
t_{12}^H							
...							
$t_{1N}^H=t_o^H$							η_{to}

$h_o = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кДж/кг}; h_k = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кДж/кг}; ct'_k = \underline{\hspace{2cm}} \text{ кДж/кг}; x_k = \underline{\hspace{2cm}}$

По данным табл. 3.3 в масштабе строят график зависимости $\eta_t = f(t_{пв} = t_1^H)$ (рис. 3.8). По этой зависимости по максимальному значению $\eta_{t_{max}}^p$ определяют оптимальное значение давления отбора пара из турбины на подогреватель p_{1opt} .

Пояснение к расчету КПД регенеративной ПТУ при $p_1=p_k$ и $p_1=p_o$

При $p_1 = p_k$ доля отбора пара на регенеративный подогреватель равна нулю, т.к. фактически его нет или он выполняет функции конденсатора:

$$ct'_k = \alpha_1 h_k + (1 - \alpha_1) ct_k \rightarrow \alpha_1 = \frac{ct'_k - ct_k}{h_k - ct_k} = 0. \quad (3.8)$$

Следовательно, при $p_1 = p_k$ термический КПД регенеративного цикла такой же, как и у цикла без регенерации $\eta_t^{рег} = \eta_{to}$.

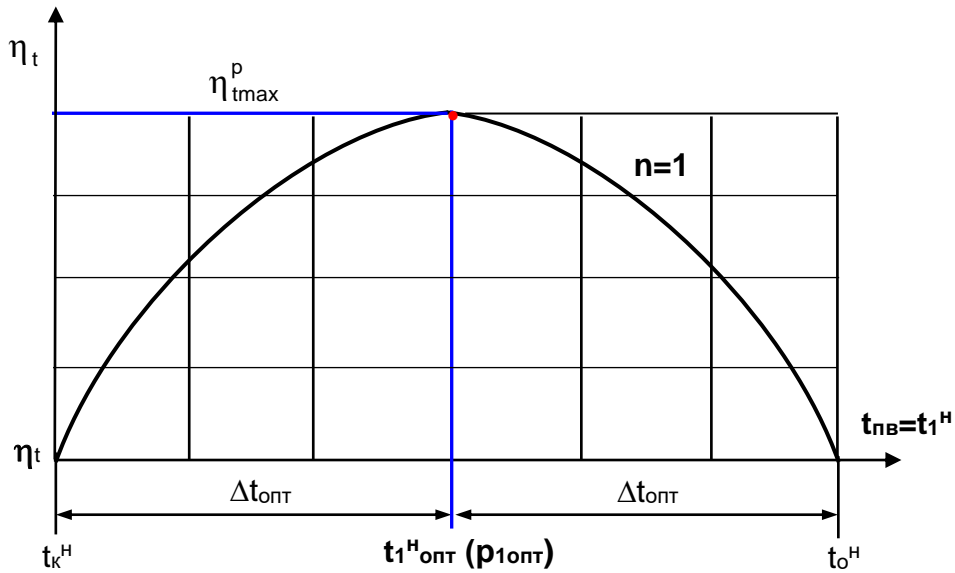


Рис. 3.8. Зависимость термического КПД ПТУ от температуры питательной воды (давления отбора пара на регенеративный подогреватель) при числе подогревателей $n=1$

При $p_1 = p_o$ доля отбора пара на регенеративный подогреватель не равна нулю

$$ct_o' = \alpha_1 h_o + (1 - \alpha_1) ct_k' \rightarrow \alpha_1 = \frac{ct_o' - ct_k'}{h_o - ct_k'}, \quad (3.9)$$

но пар, идущий на регенеративный подогреватель, не участвует в выработке полезной работы в турбине. В этом случае показатели тепловой экономичности определяются выражениями:

$$q_1 = h_o - ct_o', \quad (3.10)$$

$$q_2 = (1 - \alpha_1)(h_k - ct_k') = \left(1 - \frac{ct_o' - ct_k'}{h_o - ct_k'}\right)(h_k - ct_k') = \frac{h_o - ct_o'}{h_o - ct_k'}(h_k - ct_k'), \quad (3.11)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{1}{h_o - ct_o'} \cdot \frac{h_o - ct_o'}{h_o - ct_k'}(h_k - ct_k') = 1 - \frac{h_k - ct_k'}{h_o - ct_k'}. \quad (3.12)$$

Следовательно, и при $p_1 = p_o$ термический КПД регенеративного цикла такой же, как и у цикла без регенерации $\eta_{tper} = \eta_{to}$.

При значении давления отбора пара $p_{1опт}$ по методике [3] выполняются расчет цикла ПТУ с регенерацией и $n = 1$.

Последовательность расчета цикла ПТУ с одним регенеративным подогревателем ($n = 1$) следующая:

1. Обратимый регенеративный цикл ПТУ

По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии и степень сухости в характерных точках цикла:

h_o, h_k, x_k, ct_k' имеют такие же значения, как для простого цикла ПТУ (см. задание 1.1).

Зная оптимальное значение давления отбора пара из турбины на подогреватель p_{1opt} , определяют энтальпию отбора пара на подогреватель h_1 и энтальпию воды на выходе из подогревателя ct_1' .

По формуле (3.4) определяют долю отбора пара из турбины α_1 .

Далее рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *обратимого* регенеративного цикла ПТУ:

q_1 – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_2 – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

$l_T = l_t$ – удельная техническая работа турбины, равная удельной работе обратимого цикла ПТУ, т.к. $l_H = 0$;

η_t – термический КПД цикла ПТУ;

d_t – удельный расход пара на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ;

q_t – удельный расход теплоты на выработанный киловатт на час в цикле ПТУ.

2. Необратимый регенеративный цикл ПТУ

Используя внутренний относительный КПД турбины η_{oi} , определяют параметры для необратимого адиабатного процесса [3]:

h_{1i} – действительную энтальпию отборов пара из турбины на регенеративный подогреватель;

h_{ki}, x_{ki} – действительные энтальпию и степень сухости пара на выходе из турбины.

С учетом действительных параметров пересчитывают долю отбора пара на регенеративный подогреватель α_{1i} [3].

Рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности *необратимого* регенеративного цикла ПТУ [3]:

q_{1i} – удельная теплота, подведенная к рабочему телу в цикле;

q_{2i} – удельная теплота, отведенная от рабочего тела в цикле;

$l_{ti} = l_i$ – удельная техническая работа турбины, равная удельной работе необратимого цикла ПТУ;

η_i – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ;

$\eta_{э}$ – электрический КПД цикла ПТУ;

$d_{э}$ – удельный расход пара на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

$q_{э}$ – удельный расход теплоты на выработанный электрический киловатт на час в цикле ПТУ;

D – расход пара на паровую турбину при ее заданной электрической мощности $W_{э}$.

Основные исходные данные и результаты термодинамического расчета обратимого и необратимого регенеративного циклов ПТУ сводятся в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Результаты расчета регенеративного цикла ПТУ с $n=1$

Исходные данные	p_o , МПа	t_o , °С	p_k , МПа	n	η_{oi}	η_m	η_r	$W_{э}$, МВт	
Обратимый цикл	$\frac{q_1,}{кДж}$ кг	$\frac{q_2,}{кДж}$ кг	$\frac{l_t,}{кДж}$ кг	α_1	η_t	$\frac{d_t,}{кг}$ кВт·ч	$\frac{q_t,}{кДж}$ кВт·ч		
Необратимый цикл	$\frac{q_{1i},}{кДж}$ кг	$\frac{q_{2i},}{кДж}$ кг	$\frac{l_{ti},}{кДж}$ кг	α_{1i}	η_i	$\frac{d_{э},}{кг}$ кВт·ч	$\frac{q_{э},}{кДж}$ кВт·ч	$\eta_{э}$	$\frac{D,}{с}$ кг

3.3. Анализ и сравнение тепловой экономичности циклов ПТУ

Выполнить анализ тепловой экономичности трех циклов ПТУ: простого цикла (задание 1.1), цикла ПТУ с вторичным пароперегревателем (задание 2.1), регенеративного цикла (задание 3.1). Все циклы ПТУ рассчитывают при одинаковых параметрах пара перед турбиной p_o , t_o и давлении пара в конденсаторе турбины p_k . Основные результаты расчетов трех вышеприведенных, циклов ПТУ сводятся в табл. 3.5.

Сравнение тепловой экономичности циклов ПТУ выполняется в относительных процентах по отношению к простому циклу

(задание 1.1). Величины каждой строчки табл. 3.5 простого обратимого цикла ПТУ сравниваются с соответствующими величинами других обратимых циклов ПТУ, а необратимого простого цикла ПТУ – с соответствующими величинами других необратимых циклов ПТУ. На основании этих сравнений делается вывод о преимуществах цикла с вторичным перегревом пара или с регенерацией по отношению к простому циклу ПТУ и объясняется, чем обусловлены эти преимущества.

Делается вывод о практической возможности реализации данных циклов на основании величины x_{ki} при сопоставлении ее с допустимой степенью сухости пара на выходе из турбины $x_{кдоп}=0,88$. Для циклов с $x_{ki} < 0,88$ даются рекомендации по мероприятиям, которые позволят практически реализовать данный цикл [1].

Таблица 3.5. Основные результаты расчета циклов ПТУ

$p_o=$ бар, $t_o=$ °С, $p_k=$ бар, $Wэ=$ МВт		Простой цикл ПТУ		ПТУ с ВПП		ПТУ с регенерацией ($n=$)	
		Обратимый	Необратимый	Обратимый	Необратимый	Обратимый	Необратимый
q_1, q_{1i}	кДж/кг						
q_2, q_{2i}	кДж/кг						
l_T, l_{Ti}	кДж/кг						
l_H, l_{Hi}	кДж/кг						
η_t или η_i	%						
d_t или $d_э$	кг/(кВт·ч)						
q_t или $q_э$	кДж/(кВт·ч)						
D	кг/с	–		–		–	
На выходе из турбины							
h_k, h_{ki}	кДж/кг						
x_k, x_{ki}	–						
v_k, v_{ki}	м³/кг						
На входе в паровой котел							
$t_{пв}, t_{пви}$	°С						
$ct_{пв}, ct_{пви}$	кДж/кг						

4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЦИКЛА ПТУ

Провести термодинамический расчет теплофикационного цикла ПТУ с вторичным перегревом пара, регенерацией и отбором пара на тепловой потребитель. При расчетах работой насосов пренебречь.

Схема данной теплофикационной ПТУ и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 4.1÷4.3.

4.1. Исходные данные и объем задания 4 «Термодинамический расчет теплофикационного цикла ПТУ»

Исходные данные:

p_o и t_o – давление и температура пара перед турбиной;

$p_{вп}=p_1$ – давление пара во вторичном пароперегревателе, равное давлению отбора пара из турбины на смешивающий регенеративный подогреватель;

$t_{вп}$ – температура пара на выходе из вторичного пароперегревателя;

$p_{тп}$ – давление отбора пара из турбины на тепловой потребитель;

$t_{ктп}$ – температура возврата конденсата от теплового потребителя;

p_k – давление пара в конденсаторе турбины;

$\eta_{oi}^{ЧВД}$ – внутренний относительный КПД ЧВД турбины;

$\eta_{oi}^{ЧНД}$ – внутренний относительный КПД ЧНД турбины;

D – расход пара на турбину;

$Q_{тп}$ – тепловая мощность потребителя теплоты.

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся на сайте ИГЭУ (<http://ispu.ru/node/9840>) и в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Для получения задания необходимо ввести последние три цифры шифра (номера зачетной книжки) студента. *Обязательно при завершении ввода этих трех цифр выйдите из поля таблицы!* Пример исходных данных для расчета простого цикла ПТУ показан в табл. 4.1

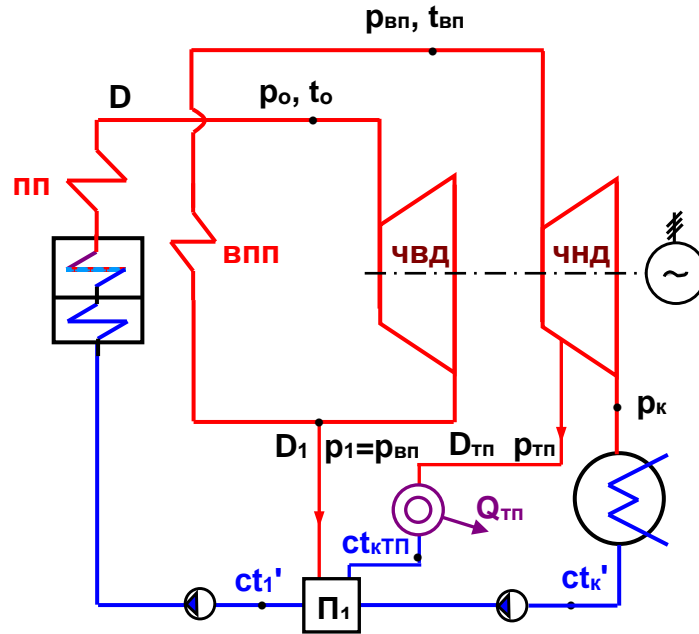


Рис. 4.1. Схема теплофикационной ПТУ с вторичным пароперегревателем и регенерацией

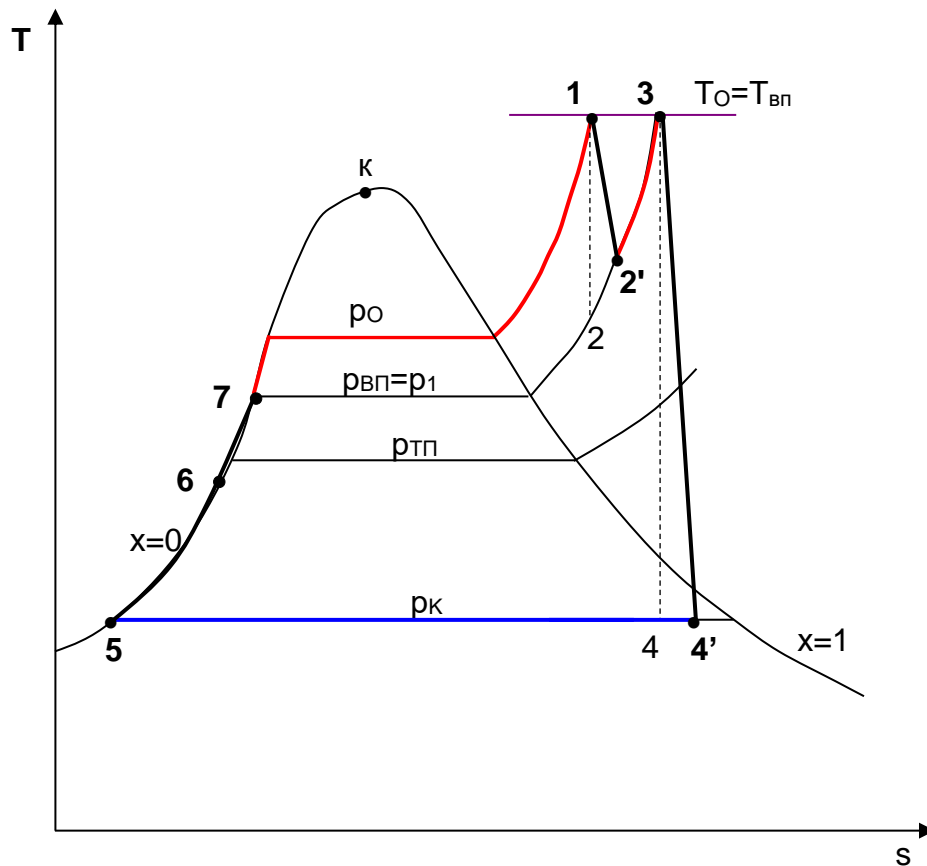


Рис. 4.2. Теплофикационный цикл ПТУ с вторичным перегревом пара в T,s-диаграмме

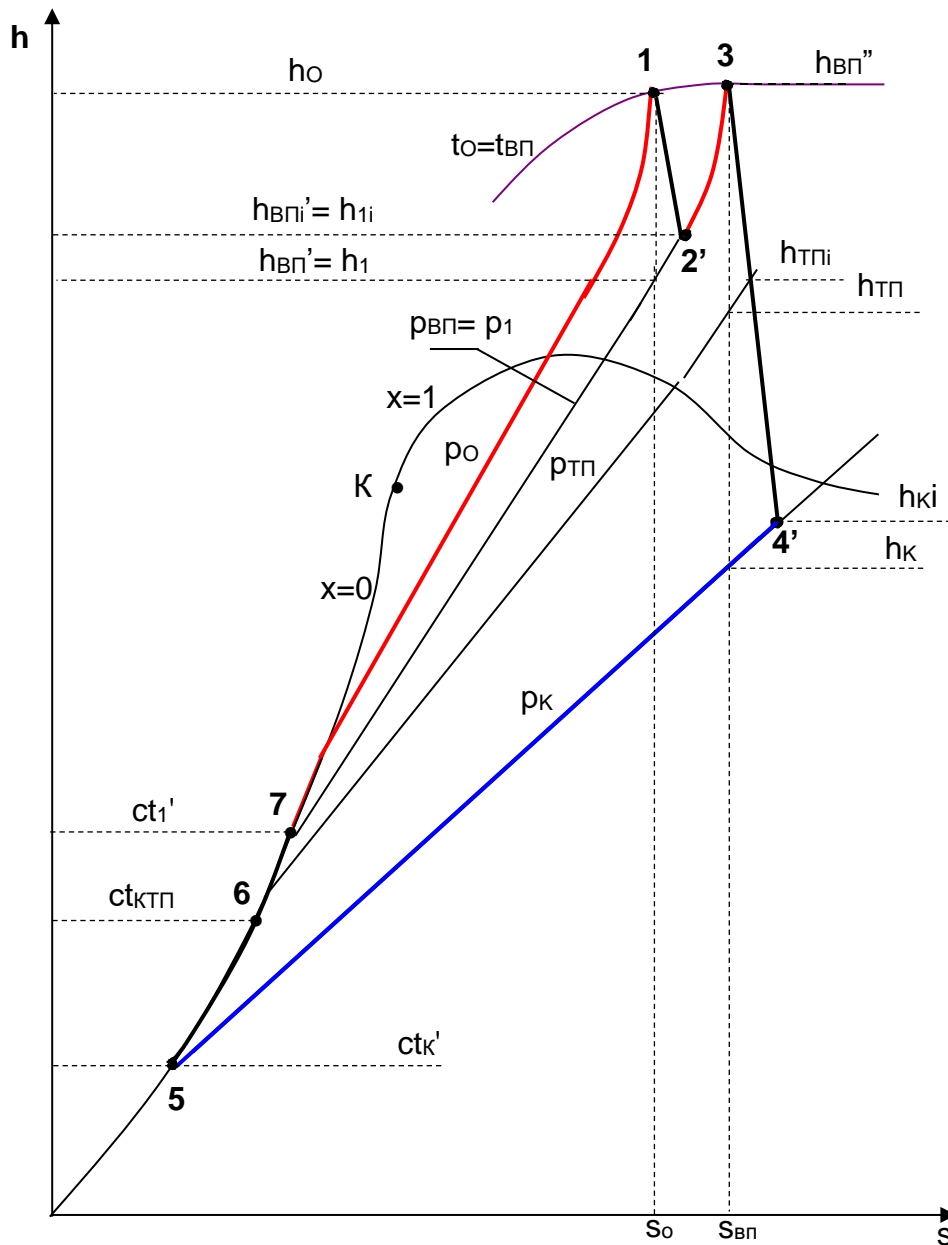


Рис. 4.3. Теплофикационный цикл ПТУ с вторичным перегревом пара в h,s -диаграмме

Таблица 4.1. Пример исходных данных для расчета теплофикационного цикла ПТУ

Последние три цифры зачетной книжки			Теплофикационный цикл ПТУ			
N_3	N_4	N_5	p_0 , МПа	t_0 , °C	p_k , МПа	$p_{вп}=p_1$, МПа
0	0	0	10	505	0,0033	3
$t_{вп}=t_0$, °C	$p_{тп}$, МПа	$t_{ктп}$, °C	$\eta_{oi}^{ЧВД}$	$\eta_{oi}^{ЧНД}$	D , кг/с	$Q_{тп}$, МВт
505	1,2	150	0,88	0,912	230	69

В пояснительной записке привести исходные данные и изобразить схему теплофикационной ПТУ и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах (аналогично рис. 4.1÷4.3).

Методика расчета теплофикационного цикла ПТУ подробно описана в разд. 4 методических указаний № 2266 [3].

Расчет теплофикационного цикла ПТУ выполнять в следующей последовательности:

1. По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии в характерных точках цикла:

h_o – энтальпия пара перед турбиной;

h_k – энтальпия пара на выходе из турбины;

$h'_{вп}$, $h''_{вп}$ – энтальпии пара на входе и выходе из ВПП;

$h_{тп}$ – энтальпия отбора пара из турбины на тепловой потребитель;

ct'_k – энтальпия воды в состоянии насыщения на выходе из конденсатора;

ct'_1 – энтальпия воды в состоянии насыщения на выходе из смешивающего регенеративного подогревателя;

$ct_{ктп}$ – энтальпия возврата конденсата от теплового потребителя.

2. Используя внутренние относительные КПД турбины $\eta_{oi}^{чвд}$ и $\eta_{oi}^{чнд}$, определяют параметры в конце необратимых адиабатных процессов:

$h'_{впi}$ – действительная энтальпия пара на входе во вторичный пароперегреватель;

$h_{1i} = h'_{впi}$ – действительная энтальпия отбора пара на смешивающий регенеративный подогреватель;

h_{ki} – действительная энтальпия на выходе из части низкого давления турбины;

$h_{тпi}$ – энтальпия отбора пара из турбины на тепловой потребитель.

3. Рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности теплофикационного цикла ПТУ [3]:

$D_{тп}$ – расход пара на тепловой потребитель;

D_1 – расход пара на смешивающий регенеративный подогреватель;

Q_1 – теплота, подведенная в цикле ПТУ к рабочему телу;

$W_{тi}$ – внутренняя мощность паровой турбины;

$W_{тп}$ – мощность турбины, произведенная потоком пара, идущим из отборов на тепловой потребитель;

η_i – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ (без учета работы насосов);

η_Q – коэффициент использования теплоты топлива цикла ПТУ;

e – коэффициент выработки электрической энергии на тепловом потреблении.

Основные исходные данные и результаты термодинамического расчета теплофикационного цикла ПТУ сводятся в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Результаты расчета теплофикационного цикла ПТУ

Исходные данные	p_o , МПа	$t_o=t_{вп}$, °С	$p_{вп}=p_1$, МПа	$p_{тп}$, МПа	$t_{ктп}$, °С
	p_k , МПа	$\eta_{oi}^{ЧВД}$	$\eta_{oi}^{ЧНД}$	D , кг/с	$Q_{тп}$, МВт
Расчетные величины	D_1 , кг/с	$D_{тп}$, кг/с	Q_1 , МВт	$W_{тi}$, МВт	$W_{тп}$, МВт
	η_i	η_Q	e		

5. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛА АЭС НА НАСЫЩЕННОМ ВОДЯНОМ ПАРЕ

Провести термодинамический расчет цикла ПТУ атомной электрической станции (АЭС) на насыщенном водяном паре. Выбрать оптимальное давление пара, идущего на пароперегреватель. Сравнить тепловую экономичность данного цикла АЭС с тепловой экономичностью аналогичной ПТУ на перегретом паре. При расчетах работой насосов пренебречь.

Схема одноконтурной АЭС на насыщенном водяном паре и ее цикл в T,s - и h,s -диаграммах представлены на рис. 5.1÷5.3.

В данном цикле степень сухости пара на выходе из реактора (точка 1) принята равной единице $x_o = 1$ (в курсовой работе она может быть другой).

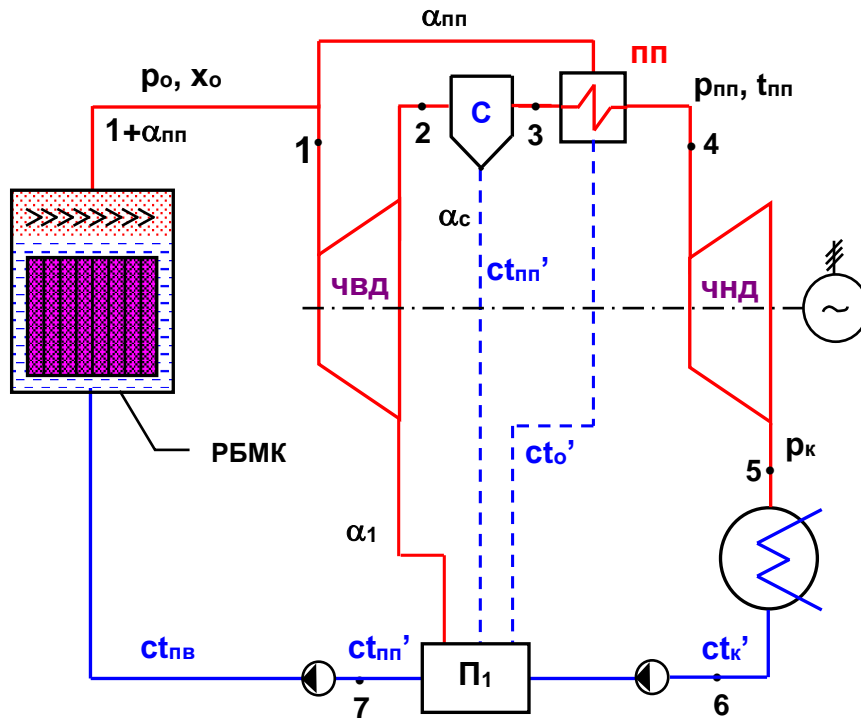


Рис. 5.1. Схема одноконтурной АЭС на насыщенном водяном паре: РБМК – ядерный реактор кипящего типа; С – сепаратор; ПП – пароперегреватель; ЧВД – часть высокого давления; ЧНД – часть низкого давления турбины; П₁ – смешивающий регенеративный подогреватель

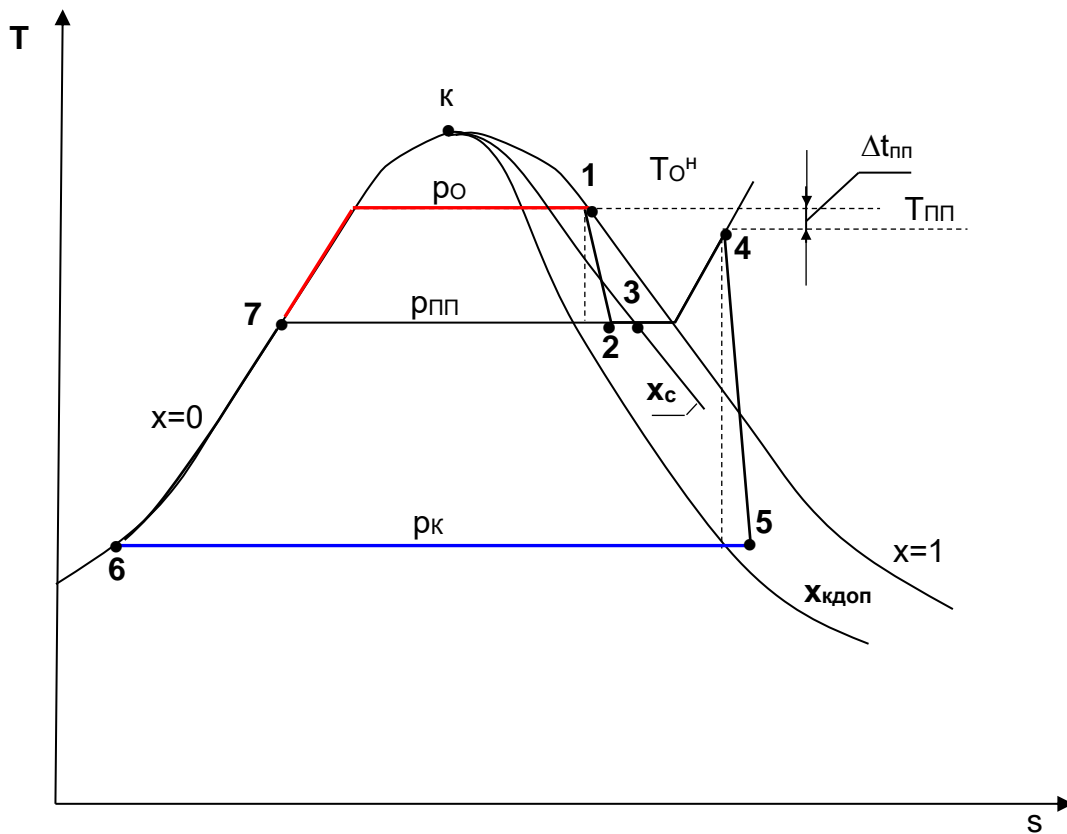


Рис. 5.2. Цикл АЭС на насыщенном паре в T,s-диаграмме

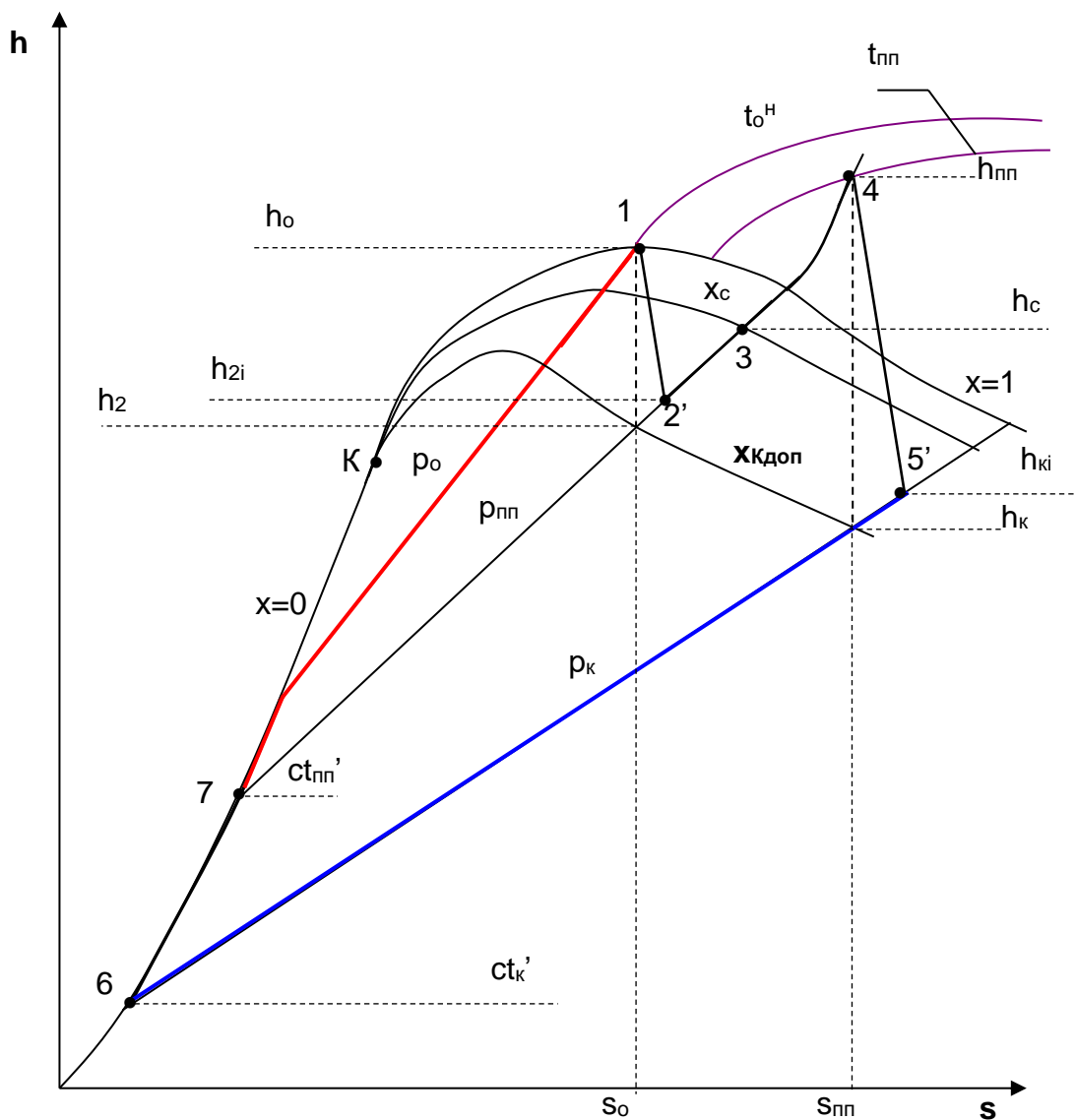


Рис. 5.3. Цикл АЭС на насыщенном паре в h,s -диаграмме

5.1. Исходные данные и объем задания 5 «Термодинамический расчет цикла АЭС на насыщенном водяном паре»

Исходные данные:

p_0 и x_0 – давление и степень сухости пара перед турбиной;

p_{np} – давление пара, идущего на пароперегреватель, равное давлению отбора пара из турбины на смешивающий регенеративный подогреватель (при выполнении курсовой работы это давление оптимизируется);

x_c – степень сухости пара на выходе из сепаратора;

Δt_{np} – недогрев температуры пара на выходе из пароперегревателя до температуры греющего пара $\Delta t_{np} = t_o^H - t_{np}$;

p_k – давление пара в конденсаторе турбины;

$\eta_{oi}^{ЧВД}$ – внутренний относительный КПД ЧВД турбины;

$\eta_{oi}^{ЧНД}$ – внутренний относительный КПД ЧНД турбины;

η_m, η_r – механический КПД и КПД электрического генератора;

W_ε – электрическая мощность турбины;

$t_o=t_{вп}$ – температура пара перед ЧВД и ЧНД турбины, работающей на перегретом паре.

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся на сайте ИГЭУ (<http://ispu.ru/node/9840>) и в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Для получения задания необходимо ввести последние три цифры шифра (номера зачетной книжки) студента. *Обязательно при завершении ввода этих трех цифр выйдите из поля таблицы!* Пример исходных данных для расчета цикла ПТУ АЭС показан в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Пример исходных данных для расчета цикла АЭС на насыщенном водяном паре

			Цикл АЭС на насыщенном водяном паре							
N_3	N_4	N_5	p_o , МПа	$x_o=x_c$	$p_{пп}$, МПа	$\Delta t_{пп}$, °С	p_k , МПа	$\eta_{oi}^{ЧВД}$	$\eta_{oi}^{ЧНД}$	W_ε , МВт
0	0	0	4	0,99	0,6	14	0,0033	0,96	0,98	400

Для всех вариантов принять одинаковыми КПД механический и КПД генератора: $\eta_m=0,98, \eta_r=0,99$.

В пояснительной записке после отражения исходных данных задания 5 выполняется схематичное изображение ПТУ АЭС на насыщенном паре и ее цикла в T,s- и h,s-диаграммах.

Методика расчета цикла ПТУ АЭС подробно описана в разд. 5 методических указаний № 2266 [3].

По таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара [4-6] находят удельные энтальпии в характерных точках цикла (рис. 5.2÷5.3):

h_o – энтальпия пара на входе в ЧВД турбины (на выходе из реактора, точка 1);

h_2 – энтальпия пара на выходе из ЧВД турбины (точка 2);

h_c – энтальпия пара на выходе из сепаратора (точка 3);

$h_{пп}$ – энтальпия пара на выходе из пароперегревателя (на входе в ЧНД турбины, точка 4);

h_k – энтальпия пара на выходе из ЧНД турбины (точка 5);

ct_k' – энтальпия воды в состоянии насыщения на выходе из конденсатора турбины (точка 6);

$ct_{пп}'$, ct_o' – энтальпии воды в состоянии насыщения на выходе из сепаратора (или П₁) и пароперегревателя;

$ct_{пв}=ct_{пп}'$ – энтальпия питательной воды, равная энтальпии воды на выходе из подогревателя П₁ (точка 7).

Сперва выполняется расчет обратимого и необратимого циклов АЭС с заданным значением давления пара, идущего на сепаратор и пароперегреватель $p_{пп}$. Результаты расчета необратимого цикла АЭС сводятся в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Результаты расчета цикла ПТУ АЭС с $p_{пп} =$ МПа

Исходные данные	p_o , МПа	x_o	x_c	$p_{пп}$, МПа	$t_{пп}$, °С	p_k , МПа	$\eta_{oi}^{чвд}$	$\eta_{oi}^{чнд}$	$W_{э}$, МВт
Расчетные величины	α_{1i}	α_{ci}	$\alpha_{ппi}$	q_{1i} , кДж/кг	$l_{тi}$, кДж/кг	η_i	$\eta_{э}$	D , кг/с	

Далее выполняется определение оптимального давления пара, идущего на сепаратор и пароперегреватель $p_{ппопт}$.

Оптимальное давление пара, идущего на пароперегреватель $p_{пп}$, определяют методом вариантных расчетов с учетом величины $x_{кдоп} \geq 0,88$. Для этого рассчитывают термические КПД η_t при семи или более значениях $p_{пп}$ в диапазоне от $p_{пп} = p_k$ до $p_{пп} = p_o$ с равным интервалом между давлениями. Значения давлений $p_{пп}$ необходимо округлять до ближайших табличных значений. Расчет выполняют для обратимого цикла АЭС на насыщенном водяном паре по методике, описанной в разд. 5 методических указаний № 2266 [3].

Результаты оптимизационного расчета $p_{ппопт}$ представляют в виде табл. 5.3. Подробный расчет величин, приведенных в табл. 5.3, приводить не надо.

Таблица 5.3. Результаты оптимизационного расчета рпп цикла ПТУ АЭС

$p_{пп},$ МПа	$\frac{h_o,}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{h_2,}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{h_c,}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{h_{пп},}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{h_k,}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{ct_o',}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{ct_k',}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{ct_{пп}',}{\kappa ДЖ}$ кг	α_c	$\alpha_{пп}$	α_1	$\frac{\ell_T,}{\kappa ДЖ}$ кг	$\frac{q_1,}{\kappa ДЖ}$ кг	x_k	η_t
$p_{пп1}=$ p_k															
$p_{пп2}$															
...															
$p_{ппN}$ $=p_o$															

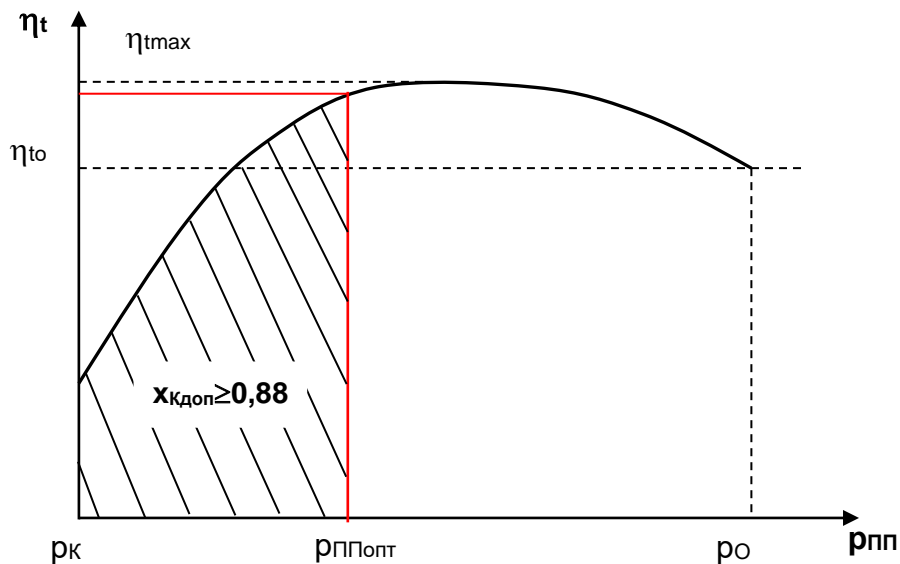


Рис. 5.4. Зависимость термического КПД цикла АЭС от давления пара, идущего на пароперегреватель: η_{to} – КПД цикла без перегрева пара; $\eta_{t\text{max}}$ – максимальное значение КПД; $p_{пп\text{опт}}$ – значение оптимального давления перегрева пара

По данным таблицы 5.3 в масштабе строят график зависимости $\eta_t=f(p_{пп})$ (рис. 5.4). По графику определяют область, где $p_{пп}$ обеспечивает допустимую влажность пара на выходе из турбины ($x_{k\text{доп}} \geq 0,88$). В этой области по максимальному значению термического КПД $\eta_{t\text{max}}$ определяют оптимальное значение давления пара, идущего на пароперегреватель $p_{пп\text{опт}}$ (рис. 5.4). При этом степень сухости пара на выходе из ЧВД турбины может быть меньше 0,88. Необходимо обратить внимание на то, что область $x_{k\text{доп}} \geq 0,88$ находится, как правило, за пределами максимального значения термического КПД.

На основании выбранного значения $p_{пп\text{ опт}}$ рассчитываются необратимый цикл АЭС и его показатели тепловой экономичности. Расчет выполняют в следующей последовательности:

1. Используя внутренние относительные КПД турбины $\eta_{oi}^{\text{чвд}}$ и $\eta_{oi}^{\text{чнд}}$, определяют параметры в конце необратимых адиабатных процессов:

h_{2i} – действительная энтальпия пара на выходе из части высокого давления турбины;

h_{ki} – действительная энтальпия на выходе из части низкого давления турбины.

2. Рассчитывают величины, используемые при оценке тепловой экономичности цикла ПТУ АЭС [3]:

α_c – доля отсепарированной влаги, взятая по отношению к расходу пара на турбину (перед турбиной $\alpha=1$);

$\alpha_{пп}$ – доля расхода пара на пароперегреватель, взятая по отношению к расходу пара на турбину;

α_1 – доля расхода пара на смешивающий подогреватель P_1 , взятая по отношению к расходу пара на турбину;

q_{1i} – удельная подведенная теплота к рабочему телу;

q_{2i} – удельная отведенная теплота от рабочего тела;

l_{ti} – удельная техническая работа турбины;

η_i – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ АЭС (без учета работы насосов);

$\eta_{э}$ – внутренний электрический КПД цикла ПТУ АЭС;

$d_{э}$ – удельный расход пара на выработанный киловатт на час электрической работы;

$q_{э}$ – удельный расход теплоты на выработанный киловатт на час электрической работы;

D – расход пара на турбину.

Основные исходные данные и результаты термодинамического расчета цикла ПТУ АЭС сводятся в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Результаты расчета цикла ПТУ АЭС при $p_{пп\text{ опт}} =$ МПа

Исходные данные	p_o , МПа	x_o	x_c	$p_{пп}$, МПа	$t_{пп}$, °С	p_k , МПа	$\eta_{oi}^{\text{чвд}}$	$\eta_{oi}^{\text{чнд}}$	$W_{э}$, МВт
Расчетные величины	α_{1i}	α_{ci}	$\alpha_{ппi}$	q_{1i} , кДж/кг	l_{ti} , кДж/кг	η_i	$\eta_{э}$	D , кг/с	

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ

1. Необходимо наличие титульного листа, содержания с указанием страниц разделов, списка использованной литературы. Нумерация страниц обязательна (проставляется со второй страницы), все рисунки и таблицы должны иметь подписи.
2. В начале каждой главы пишется заголовок и текст задания. Приводится таблица исходных данных из файла MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ».
3. Глава каждого задания должна включать разделы с заглавиями, соответствующими пунктам номеров раздела (1.1. Расчет простого цикла ПТУ и т.д.).
4. Перед расчетной частью каждой ПТУ должны быть приведены ее схема и цикл в T,s - и h,s -диаграммах (на одной диаграмме одновременно показывается обратимый и необратимый циклы ПТУ).
5. Расчетная часть должна сопровождаться краткими пояснениями, а форма записи вычислений соответствовать следующему виду: *величина=расчетная формула=численные значения величин формулы=результат, размерность.*
6. Все рекомендованные таблицы результатов расчета, включая таблицы исходных данных, должны быть приведены в соответствующих разделах.
7. При построении графиков расчетных зависимостей в масштабе необходимо следующее:
 - наличие примеров расчета соответствующих параметров и сводных таблиц параметров этих точек (не менее 7);
 - на графике должна присутствовать масштабная сетка, а оптимизируемая величина показана в виде проекции соответствующей точки на оси координат.
8. В разделах, где требуется выполнение анализа и выводов по результатам расчета, необходимо приводить численные значения величин, подтверждающих то или иное утверждение.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чухин, Иван Михайлович.** Техническая термодинамика. Ч. 2: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 228 с.
2. **Чухин, Иван Михайлович.** Сборник задач по технической термодинамике: учеб. пособие / И.М. Чухин; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 248 с.
3. **Чухин, Иван Михайлович.** Расчет термодинамической эффективности циклов паротурбинных установок / И.М. Чухин; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» – Иваново, 2015, 56 с. (№ 2266)
4. **Ривкин, Соломон Лазаревич.** Теплофизические свойства воды и водяного пара: справочник / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.
5. **Александров, Алексей Александрович.** Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М.: МЭИ, 2003. – 168 с.
6. **Александров, Алексей Александрович.** Теплофизические свойства рабочих веществ теплоэнергетики: справочник / А.А. Александров, К.А. Орлов, В.Ф. Очков. – М.: МЭИ, 2009. – 224 с.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ПРОСТОГО ЦИКЛА ПТУ.....	4
1.1. Исходные данные и объем задания 1.1 «Термодинамический расчет простого цикла ПТУ».....	5
1.2. Исходные данные и объем задания 1.2 «Оптимизация начального давления простого цикла ПТУ».....	8
2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛА ПТУ С ВТОРИЧНЫМ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕМ.....	10
2.1. Исходные данные и объем задания 2.1 «Термодинамический расчет цикла ПТУ с ВПП».....	10
2.2. Исходные данные и объем задания 2.2 «Оптимизация давления вторичного перегрева пара для цикла ПТУ с ВПП»	14
3. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ЦИКЛА ПТУ	17
3.1. Исходные данные и объем задания 3.1 «Термодинамический расчет регенеративного цикла ПТУ».....	17
3.2. Исходные данные и объем задания 3.2 «Оптимизация давления отбора пара цикла ПТУ с одним регенеративным смешивающим подогревателем».....	21
3.3. Анализ и сравнение тепловой экономичности циклов ПТУ.....	28
4. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ТЕПЛОФИКАЦИОННОГО ЦИКЛА ПТУ.....	30
4.1. Исходные данные и объем задания 4 «Термодинамический расчет теплофикационного цикла ПТУ»	30
5. РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛА АЭС НА НАСЫЩЕННОМ ВОДЯНОМ ПАРЕ.....	34
5.1. Исходные данные и объем задания 5 «Термодинамический расчет цикла АЭС на насыщенном водяном паре»	36
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РАБОТЫ.....	41
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	42
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Образец титульного листа	44
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Бланки заданий.....	45



Образец титульного листа

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

Кафедра теоретических основ теплотехники

Курсовая работа
по дисциплине «Техническая термодинамика, часть 2»

**РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ
ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Выполнил
студент гр. 2-0
И.О. Фамилия
№ з.к. 00000

Проверил
доц. каф.ТОТ
И.О. Фамилия

Оценка: _____

Иваново 2021

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Бланки заданий

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина

Кафедра ТОТ

Задание для выполнения курсовой работы по ТТД часть 2

«Анализ тепловой экономичности циклов ПТУ»

Студенту _____ группа _____

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Для получения задания необходимо ввести последние три цифры шифра (номера зачетной книжки) студента. Обязательно при завершении ввода этих трех цифр выйдите из поля таблицы.

Исходные данные заданий 1.1 и 1.2

Последние три цифры зачетной книжки			Простой цикл ПТУ					$W_э,$ МВт
N_3	N_4	N_5	$p_o, \text{ МПа}$	$t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_k, \text{ МПа}$	η_{oi}	η_n	

Исходные данные заданий 2.1 и 2.2

Последние три цифры зачетной книжки			Цикл ПТУ с ВПП				
N_3	N_4	N_5	$t_{вп} = t_o, \text{ }^\circ\text{C}$	$p_{вп}, \text{ МПа}$	$\eta_{oi}^{\text{ЧВД}}$	$\eta_{oi}^{\text{ЧНД}}$	η_n

Исходные данные заданий 3.1 и 3.2

Последние три цифры зачетной книжки			Регенеративный цикл ПТУ	
N_3	N_4	N_5	n	η_{oi}

Для всех заданий принять КПД механический и КПД генератора: $\eta_m=0,98$, $\eta_r=0,99$.

Задание выдано: _____ 20__ г. _____ / _____ /

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Кафедра ТОТ

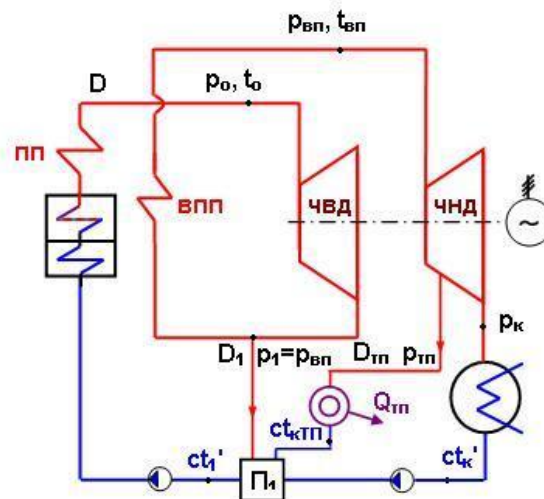
Задание для выполнения курсовой работы по ТТД часть 2
«Анализ тепловой экономичности циклов ПТУ»

Студенту _____ группа _____

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Исходные данные задания 4
«Термодинамический расчет теплофикационного цикла ПТУ»

Последние три цифры зачетной книжки			Теплофикационный цикл ПТУ			
N ₃	N ₄	N ₅	p ₀ , МПа	t ₀ , °С	p _к , МПа	p _{вп} =p ₁ , МПа
t _{вп} =t ₀ , °С	p _{тп} , МПа	t _{ктп} , °С	η _{oi} ^{ЧВД}	η _{oi} ^{ЧНД}	D, кг/с	Q _{тп} , МВт



Задание выдано: _____ 20__ г. _____ / _____ /

Задание для выполнения курсовой работы по ТТД часть 2

«Анализ тепловой экономичности циклов ПТУ»

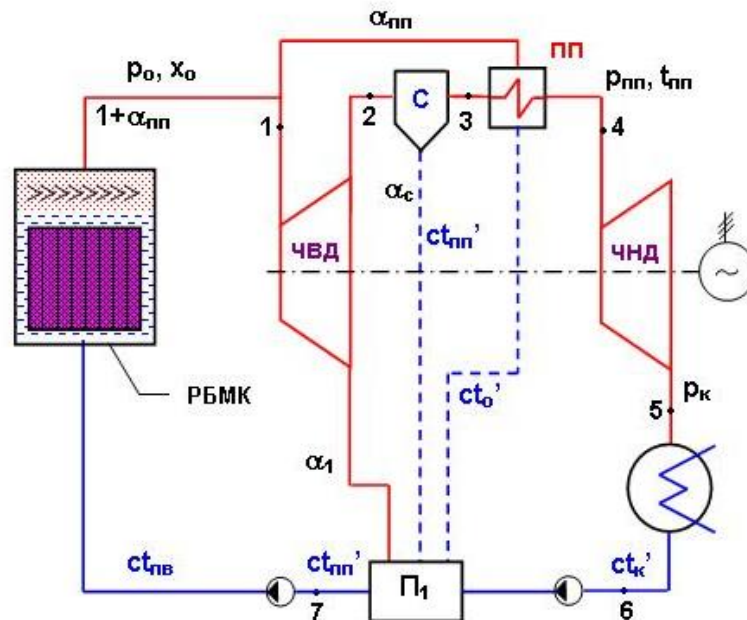
Студенту _____ группа _____

Варианты исходных данных формируются автоматически в файле MS Excel «Варианты расчета циклов ПТУ», находящемся в личном кабинете на сайте электронной информационно-образовательной среды ИГЭУ «Бумеранг» (<http://bumerang.ispu.ru/>).

Исходные данные задания 5 «Термодинамический расчет цикла АЭС на насыщенном водяном паре»

Последние три цифры зачетной книжки			Цикл АЭС на насыщенном водяном паре							
N ₃	N ₄	N ₅	p_0 , МПа	$x_0=x_c$	$p_{пп}$, МПа	$\Delta t_{пп}$, °С	p_k , МПа	$\eta_{oi}^{чвд}$	$\eta_{oi}^{чнд}$	$W_э$, МВт

Для всех вариантов принять одинаковыми КПД механический и КПД генератора: $\eta_m=0,98$, $\eta_r=0,99$.



Задание выдано: _____ 20__ г. _____ / _____ /

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ ЦИКЛОВ ПТУ

Методические указания и задания для выполнения
курсовой работы по дисциплине «Техническая термодинамика»

Составители ЧУХИН Иван Михайлович

РАКУТИНА Дарья Валериевна

Редактор МИХАЛЕВА Натела Борисовна

Подписано в печать . . . 2021 г. Формат 60×84 I/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. Тираж 300 экз. Заказ
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.