

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра энергофизики**

УДК 536.717, 536.8, 536-1

ШАРШУКОВ
Евгений Викторович

**ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
МОДЕЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ «АНАЛИЗ ЦИКЛА
РЕНКИНА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПЕРЕГРЕВОМ ПАРА»**

Дипломная работа

Научный руководитель:
старший преподаватель
кафедры энергофизики БГУ
Ларькин А.В.

Рецензент:
старший преподаватель
кафедры ядерной физики БГУ
Семенович О.В.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой энергофизики БГУ
доцент, к.ф.-м.н. _____ А.В. Мазаник
« ____ » _____ 2019 г.

Минск, 2019

РЭФЕРАТ

Дыпломная работа, 41 старонка, 19 малюнкаў, 10 крыніц, 1 дадатак.

АТАМНАЯ ЭЛЕКТРЫЧНАЯ СТАНЦЫЯ, ВОДА-ВАДЗЯНЫ ЭНЕРГЕТЫЧНЫ РЭАКТАР, КАНДЭНСАТАР, КАЭФІЦЫЕНТ КАРЫСНАГА ДЗЕЯННЯ, ПАРАПЕРАГРАВАЛЬНІК, ПЕРАГРЭЎ ПАРЫ, ПРАМЕЖНЫ ПЕРАГРЭЎ ПАРЫ, СТРАТЫ АД НЕЗВАРОТНАСЦІ, ТУРБІНА, ЦЕПЛЫНЯ, ЦЫКЛ РЭНКІНА, ЭЛЕКТРАЭНЕРГІЯ.

Мэта работы – распрацоўка мадэльнай лабараторнай работы для аналітычнага вывучэння цыклаў Рэнкіна з перагрэвам пары і прамежным перагрэвам пары з улікам і без уліка страт ад незваротнасці, а таксама метадычных указанняў да яе.

Методыка эксперыменту – мадэліраванне і разлік тэрмічнага і сапраўднага ККДз цыклаў Рэнкіна з перагрэвам пары і прамежным перагрэвам пары (для рэактара ВВЭР) з улікам і без уліка страт ад незваротнасці з выкарыстаннем матэматычнага праграмнага пакету для мадэліравання MATLAB.

Падчас выканання работы былі візуалізаваны цыклы Рэнкіна з перагрэвам пары і прамежным перагрэвам пары (для рэактара ВВЭР) з улікам і без уліка страт ад незваротнасці; разлічаны значэнні тэрмадынамічных параметраў пары ў розных кропках ідэальнага і сапраўднага цыклаў Рэнкіна з перагрэвам пары і прамежным перагрэвам пары (для рэактара ВВЭР); рэалізаваны разлік тэрмічнага і сапраўднага ККДз дадзеных цыклаў; праведзены аналіз уплыву пачатковых параметраў на іх тэрмічны і сапраўдны ККДз.

Атрыманыя вынікі ляглі ў аснову мадэльнай лабараторнай работы цыклу «Цепловые схемы и режимы работы ядерных энергетических установок» для студэнтаў спецыялізацыі 1-31 04 06 03 «Фізіка ядзерных рэактараў і атамных энергетических установок» спецыяльнасці 1-31 04 06 «Ядзерная фізіка і тэхналогіі».

РЕФЕРАТ

Дипломная работа, 41 страница, 19 рисунков, 10 источников, 1 приложение.

АТОМНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, ВОДО-ВОДЯНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РЕАКТОР, КОНДЕНСАТОР, КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ, ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ, ПЕРЕГРЕВ ПАРА, ПОТЕРИ ОТ НЕОБРАТИМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНЫЙ ПЕРЕГРЕВ ПАРА, ТЕПЛОТА, ТУРБИНА, ЦИКЛ РЕНКИНА, ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ.

Цель работы – разработка модельной лабораторной работы для аналитического изучения циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара с учётом и без учёта потерь от необратимости, а также методических указаний к ней.

Методика эксперимента – моделирование и расчёт термического и действительного КПД циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с учётом и без учёта потерь от необратимости с использованием математического программного пакета для моделирования MATLAB.

В ходе выполнения работы были визуализированы циклы Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с учётом и без учёта потерь от необратимости; рассчитаны значения термодинамических параметров пара в различных точках идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР); реализован расчёт термического и действительного КПД данных циклов; проведён анализ влияния начальных параметров на их термический и действительный КПД.

Полученные результаты легли в основу модельной лабораторной работы цикла «Тепловые схемы и режимы работы ядерных энергетических установок» для студентов специализации 1-31 04 06 03 «Физика ядерных реакторов и атомных энергетических установок» специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии».

ABSTRACT

Thesis, 41 pages, 19 figures, 10 sources, 1 appendix.

CAPACITOR, EFFICIENCY, ELECTRICITY, HEAT, INTERMEDIATE STEAM OVERHEATING, LOSS OF INCREASABILITY, NUCLEAR POWER PLANT, RANKINE CYCLE, STEAM OVERHEATING, SUPERHEATER, TURBINE, WATER-WATER ENERGY REACTOR.

The aim of the work is to develop a model laboratory work for the analytical study of Rankine cycles with steam overheating and intermediate steam overheating with and without taking into account losses from irreversibility, as well as guidelines for it.

Experimental technique - modeling and calculation of thermal and actual efficiency of Rankine cycles with steam overheating and intermediate steam overheating (for WWER reactor) with and without accounting for losses from irreversibility using the mathematical software package for modeling MATLAB.

In the course of the work, Rankine cycles with steam overheating and intermediate steam superheating (for WWER reactors) were visualized with and without losses from irreversibility; values of thermodynamic parameters of steam were calculated at various points of the ideal and real Rankine cycles with steam overheating and steam intermediate overheating (for a WWER reactor); calculation of the thermal and actual efficiency of these cycles; the analysis of the influence of the initial parameters on their thermal and actual efficiency was carried out.

The results formed the basis of the model laboratory work of the cycle “Thermal circuits and operating modes of nuclear power plants” for students of specialization 1-31 04 06 03 “Physics of nuclear reactors and nuclear power plants” specialty 1-31 04 06 “Nuclear physics and technologies”.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1 ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК.....	9
1.1 Цикл Ренкина.....	9
1.2 Цикл Ренкина с перегревом пара.....	12
1.3 Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР ...	14
1.4 Идеальный и реальный циклы Ренкина. Учёт потерь от необратимости .	17
ГЛАВА 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ РЕНКИНА..	21
2.1 Использование программного пакета для моделирования MATLAB	21
2.2 Моделирование идеального цикла Ренкина с перегревом пара.....	22
2.3 Моделирование реального цикла Ренкина с перегревом пара.....	22
2.4 Моделирование идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР	23
2.5 Моделирование реального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР	24
ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	26
3.1 Результаты моделирования цикла Ренкина с перегревом пара	26
3.2 Результаты моделирования цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР	30
3.3 Степень внедрения	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	41
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методические указания к лабораторной работе «Анализ цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара»	42

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭС	— атомная электрическая станция
T	— температура
s	— удельная энтропия
p	— давление
h	— удельная энтальпия
x	— степень сухости пара
КПД	— коэффициент полезного действия
ВВЭР	— водо-водяной энергетический реактор
ЦВД	— цилиндры высокого давления турбины
ЦНД	— цилиндры низкого давления турбины

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем в современном мире является энергопотребление. С каждым днём потребность общества и производств в электроэнергии возрастает, в то же время, традиционные ресурсы, которые используются для генерации электроэнергии, являются исчерпаемыми и практически невозобновляемыми.[1] По этой причине разработка высокоэффективных энергетических установок и поиск альтернативных источников энергии являются как никогда актуальными, в том числе и для Республики Беларусь.

Основной цикл, используемый в энергетических установках – цикл Ренкина.[2] В связи с этим исследования в области оптимизации и увеличения эффективности цикла Ренкина являются важными для энергетики.

Стоит отметить, что в соответствии с Указом Президента Республики Беларусь от 12.11.2007 г. №565 «О некоторых мерах по строительству атомной электростанции», в нашей стране началось строительство атомной электростанции (АЭС). Лабораторная работа, разработанная в рамках дипломной работы, позволяет моделировать термодинамический цикл реальной АЭС, что является крайне важным для обучения квалифицированных специалистов в области атомной энергетики, подготовка которых ведётся в соответствии с «Государственной программой подготовки кадров для ядерной энергетики Республики Беларусь на 2008-2020 годы», утверждённой Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.09.2008 №1329.

Целью работы является разработка модельной лабораторной работы для аналитического изучения циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара с учётом и без учёта потерь от необратимости, а также методических указаний к ней, в ходе которой студенты смогут:

- изучить принцип работы энергетических установок, работающих по циклу Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара, с учётом и без учёта потерь от необратимости;
- провести моделирование цикла Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара с помощью программного обеспечения в среде MATLAB;
- определить коэффициенты полезного действия циклов Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара при различных параметрах рабочей среды, а также термодинамические характеристики в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина.

Задачи дипломной работы:

- изучение литературных источников по методам моделирования термодинамических процессов;
- разработка математической модели для расчёта циклов Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара с учётом и без учёта потерь от необратимости;
- реализация математической модели для расчёта циклов Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара с учётом и без учёта потерь от необратимости с помощью программного обеспечения в среде MATLAB;
- написание методических указаний к разработанной лабораторной работе.

ГЛАВА 1

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

1.1 Цикл Ренкина

На современных тепловых электростанциях большой мощности превращение теплоты в работу производится в циклах, в которых в качестве основного рабочего тела используется водяной пар высокого давления и температуры. Водяной пар производят в парогенераторах.

Термодинамический цикл преобразования теплоты в работу с помощью водяного пара был предложен в середине XIX физиками Ренкиным и Клаузиусом. Принципиальная тепловая схема энергетической установки, работающей по циклу Ренкина, показана на рисунке 1.1.

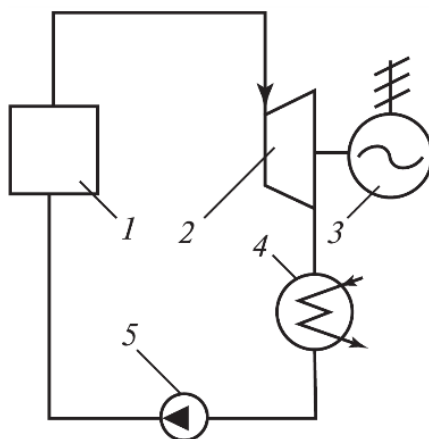


Рисунок 1.1 – Принципиальная тепловая схема электростанции, работающей по циклу Ренкина, где:

- 1 – парогенератор;
- 2 – турбина;
- 3 – электрогенератор;
- 4 – конденсатор;
- 5 – насос.

Вода нагнетается в парогенератор 1 насосом 5 и за счет теплоты превращается в водяной пар, который затем поступает в турбину 2, вращающую электрогенератор 3. Тепловая энергия пара преобразуется в турбине в механическую работу, которая, в свою очередь, преобразуется в генераторе в электроэнергию. Из турбины отработанный пар поступает в

конденсатор 4. В конденсаторе пар превращается в воду (конденсируется), которая с помощью насоса 5 вновь подается в парогенератор.

Цикл Ренкина в Ts -диаграмме изображен на рисунке 1.2.

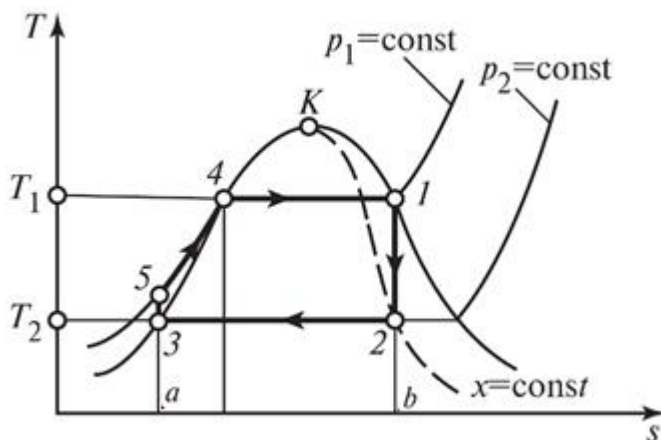


Рисунок 1.2 – Ts -диаграмма цикла Ренкина, где:

- 5-4 – нагрев воды в котле до кипения;
- 4-1 – процесс парообразования;
- 1-2 – расширение пара в турбине;
- 2-3 – конденсация пара;
- 3-5 – сжатие воды насосом.

Влажный пар после турбины поступает в конденсатор и полностью в нём конденсируется при давлении $p_2 = const$ (процесс 2-3).

Затем вода сжимается насосом от давления p_2 до давления p_1 , этот адиабатный процесс показан в Ts -диаграмме вертикальным отрезком 3-5. Отметим, что длина отрезка 3-5 весьма мала; в области жидкости изобары в Ts -диаграмме проходят очень близко друг от друга, поэтому зачастую при изображении цикла Ренкина в Ts -диаграмме изобары в области жидкости сливаются с левой пограничной кривой и отрезком 3-5 пренебрегают.

Из насоса вода под давлением p_1 поступает в котел, где к ней в изобарном процессе $p_1 = const$ подводится теплота. Вначале вода в котле нагревается до кипения (участок 5-4 изобары $p_1 = const$), а затем, по достижении температуры кипения, происходит изотермический и изобарный процесс парообразования (участок 4-1 изобары $p_1 = const$).

Сухой насыщенный пар, получаемый в котле, поступает в турбину. Адиабатное расширение пара в турбине 1-2 – процесс получения работы в цикле.

Отработанный влажный пар поступает в конденсатор, и цикл замыкается.[3]

Проведём расчёт термического коэффициента полезного действия (КПД) цикла Ренкина. Количество теплоты q_1 , подводимой к рабочему телу в цикле, изображается в Ts -диаграмме на рисунке 1.2 площадью $a-3-5-4-1-b-a$. Теплота q_2 , отводимая в цикле, эквивалентна площади $a-3-2-b-a$, а работа цикла – площади $3-5-4-1-2-3$.

Поскольку процессы подвода и отвода теплоты в цикле Ренкина осуществляются по изобарам, а в изобарном процессе количество подведенной (отведенной) теплоты равно разности энтальпий рабочего тела в начале и конце процесса, то применительно к циклу Ренкина можно записать выражения (1) и (2).

$$q_1 = h_1 - h_5 \quad (1)$$

$$q_2 = h_2 - h_3 \quad (2)$$

Здесь h_1 – энтальпия перегретого водяного пара на выходе из котла (при давлении p_1 и температуре T_1); h_5 – энтальпия воды на входе в котел, т.е. на выходе из насоса (при давлении p_1 и температуре T_5); h_2 – энтальпия влажного пара на выходе из турбины, т.е. на входе в конденсатор (при давлении p_2 и степени сухости x_2), а h_3 – энтальпия воды на выходе из конденсатора (она равна энтальпии воды на линии насыщения h' при температуре насыщения T_2 , однозначно определяемой давлением p_2).

С учетом соотношений (1) и (2) из общего уравнения для термического КПД цикла (3) получаем выражение для КПД цикла Ренкина (4а).

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \quad (3)$$

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_5) - (h_2 - h_3)}{h_1 - h_5} \quad (4a)$$

Уравнение (4а) может быть записано в виде (4б).

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_2) - (h_5 - h_3)}{h_1 - h_5} \quad (4б)$$

Разность $h_1 - h_2$ представляет собой располагаемый перепад энтальпий, превращаемый в кинетическую энергию потока и затем в работу в турбине, разность же $h_5 - h_3$ – это техническая работа насоса. Таким образом, работу,

производимую в цикле, можно рассматривать как разность работы, полученной в турбине, и работы, затрачиваемой на привод насоса. Таким образом, выражение для термического КПД цикла Ренкина примет вид (4в).

$$\eta_t = \frac{l_t - l_{\text{нас}}}{h_1 - h_5} \quad (4в)$$

где l_t – работа турбины; $l_{\text{нас}}$ – работа насоса.

Цикл Ренкина с точки зрения термического КПД представляется менее выгодным, чем обратимый цикл Карно, поскольку степень заполнения цикла (равно как и средняя температура подвода теплоты) для цикла Ренкина оказывается меньше, чем для цикла Карно. Однако с учетом реальных условий осуществления цикла и значительно меньшего влияния необратимости процесса сжатия воды по сравнению со сжатием влажного пара на общий КПД цикла экономичность цикла Ренкина выше экономичности соответствующего цикла Карно во влажном паре. Вместе с тем замена громоздкого компрессора для сжатия влажного пара компактным водяным насосом позволяет существенно снизить затраты на сооружение теплосиловой установки и упростить ее эксплуатацию.[3]

1.2 Цикл Ренкина с перегревом пара

Для того чтобы увеличить термический КПД цикла Ренкина и закончить процесс расширения пара в турбине в области более высокой степени сухости, чтобы условия работы проточной части турбины оказались более легкими, применяют так называемый перегрев пара.

В этом случае средняя температура подвода теплоты увеличивается по сравнению с температурой подвода теплоты в цикле без перегрева и, следовательно, термический КПД цикла возрастает.

Цикл Ренкина с перегретым паром в Ts -диаграмме показан на рисунке 1.3.

внутренний КПД цикла η_i ; величина η_i для цикла с перегревом возрастает как за счет роста термического КПД, так и за счет роста внутреннего относительного КПД турбины.

Цикл Ренкина с перегревом пара является основным циклом теплосиловых установок, применяемых в современной теплоэнергетике.[3]

1.3 Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР

Рассмотрим цикл паротурбинной установки АЭС с наиболее широко применяемым водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР), схема которой показана на рисунке 1.4.[4]

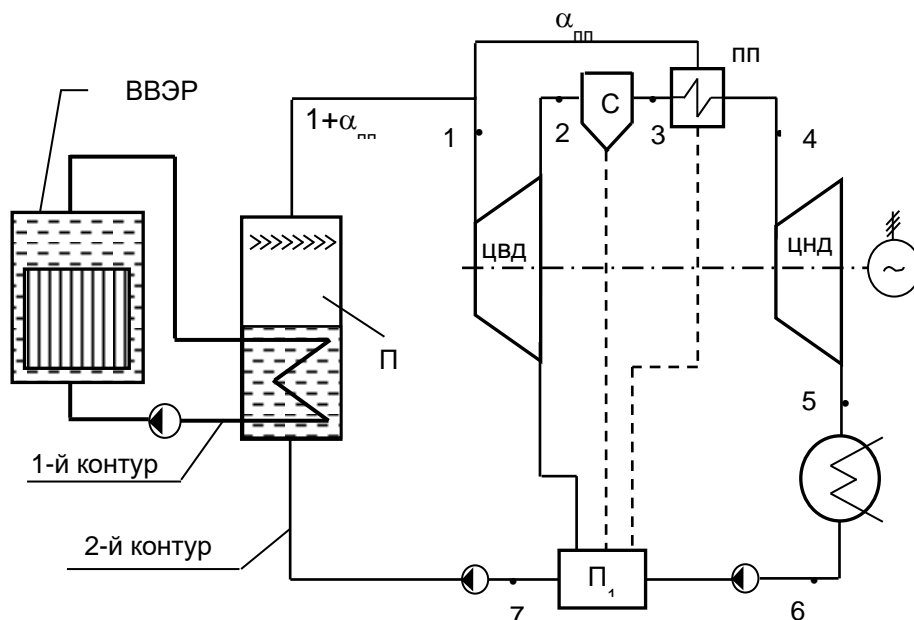


Рисунок 1.4 – Схема двухконтурной АЭС, работающей по циклу Ренкина с промежуточным перегревом пара, где:

ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;

ПГ – парогенератор;

С – сепаратор;

ПП – пароперегреватель;

ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления турбины;

П₁ – смешивающий регенеративный подогреватель.

Данная АЭС является двухконтурной. В первом контуре вода, служащая одновременно и замедлителем, и теплоносителем, прокачивается циркуляционным насосом через реактор. В реакторе вода нагревается до температуры более низкой, чем температура насыщения при данном давлении.

Нагретая вода поступает в парогенератор ПГ, где, отдавая теплоту воде и пару второго контура, охлаждается, после чего направляется снова в реактор.

В ходе работы двухконтурной АЭС с термодинамической точки зрения осуществляется цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара, Ts -диаграмма которого представлена на рисунке 1.5.

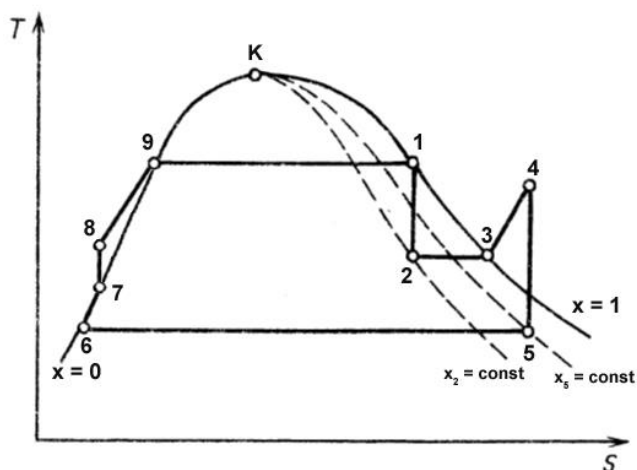


Рисунок 1.5 – Ts -диаграмма идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара, где:

- 8-9 – нагрев воды в парогенераторе;
- 9-1 – процесс парообразования;
- 1-2 – расширение пара в ЦВД турбины;
- 2-3 – сепарация пара;
- 3-4 – перегрев пара в пароперегревателе;
- 4-5 – расширение пара в ЦНД турбины;
- 5-6 – конденсация пара;
- 6-7 – подогрев воды в подогревателе;
- 7-8 – сжатие воды насосом.

Насыщенный пар второго контура, приготовленный в парогенераторе (участок 9-1), имеет давление p_1 и температуру T_1 (точка 1 в Ts -диаграмме на рисунке 1.5).

Основная часть его поступает в цилиндр высокого давления (ЦВД) турбины, где адиабатно расширяется до промежуточного давления p_2 в процессе 1-2, совершая работу.

В состоянии 2 влажный пар направляется в сепаратор С, где отделяется жидкая фаза (участок 2-3), которая передается затем в подогреватель питательной воды П₁.

Сухой насыщенный пар состояния 3 из сепаратора передается в пароперегреватель ПП. Здесь он при постоянном давлении p_2 перегревается до

температуры T_4 (процесс 3-4) промежуточно отобранном паром состояния 1, не прошедшим через турбину.

Отдавая теплоту, этот греющий пар конденсируется и получившийся конденсат дренируется в подогреватель питательной воды Π_1 .

Перегретый же пар адиабатно расширяется в цилиндре низкого давления (ЦНД) турбины (участок 4-5) до давления в конденсаторе К, равного p_5 . Адиабатное расширение пара в турбине 4-5 – также процесс получения работы в цикле, наряду с участком 1-2. [5]

Проведём расчёт термического КПД такого цикла. Для этого предварительно необходимо определить расход пара на паро-паровой перегрев.

Расход пара через ЦНД определяется в соответствии с выражением (5).

$$D_3 = x_2 D_2 \quad (5)$$

где D_2 – расход пара через ЦВД, кг/с; x_2 – степень сухости этого пара в конце его расширения в ЦВД (точка 2 на рисунке 1.5).

Расход греющего пара в паро-паровой перегревателе $D_{пп}$, необходимый для перегрева пара после сепаратора, может быть определён из теплового баланса паро-парового перегревателя (6).

$$D_{пп} = x_2 D_2 \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h'_1} \quad (6)$$

где $D_{пп}$ – расход пара на паро-паровой перегрев, кг/с; h_i – энтальпия в i -й точке цикла (рисунок 1.5); h'_i – энтальпия в точке, соответствующей давлению p_i и степени сухости пара 0.

Введём относительную величину – доля пара, отбираемая на паро-паровой перегрев $\alpha_{пп}$, которая рассчитывается в соответствии с выражением (7).

$$\alpha_{пп} = \frac{D_{пп}}{D_2} = x_2 \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h'_1} \quad (7)$$

Полный расход пара, поступающего из парогенератора, в этом случае будет рассчитываться по формуле (8).

$$D_1 = D_2 + D_{пп} = D_2 (1 + \alpha_{пп}) = D_2 \left(1 + x_2 \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h'_1} \right) \quad (8)$$

где D_1 – расход пара из парогенератора; $\alpha_{пп} = \frac{D_{пп}}{D_2}$ – доля пара, отбираемая на паро-паровой перегрев.

Таким образом, термический КПД цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), используя (3), вычисляется по формуле (9а).

$$\eta_t = \frac{D_2((h_1 - h_2) + x_2(h_4 - h_5)) - l_{\text{нас}}}{D_1(h_1 - h_8)} \quad (9a)$$

где $l_{\text{нас}}$ – работа насоса.

Выражение (9а), используя (8), можно переписать следующим образом:

$$\eta_t = \frac{l_T - l_{\text{нас}}}{(1 + \alpha_{пп})(h_1 - h_8)} \quad (9б)$$

где $l_T = (h_1 - h_2) + x_2(h_4 - h_5)$.

Таким образом, на значение термического КПД цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) влияет, помимо работ турбины и насоса, расход пара на паро-паровой перегрев.[5]

1.4 Идеальный и реальный циклы Ренкина. Учёт потерь от необратимости

Термический КПД идеального цикла Ренкина с перегревом пара, как было показано ранее, определяется соотношениями (4).

Рассмотрим теперь реальный цикл Ренкина (цикл с потерями, обусловленными необратимостью реальных процессов). Рассмотрение потерь от необратимости в цикле Ренкина проведем с помощью метода коэффициентов полезного действия.

Цель этого рассмотрения – выяснить, в каких элементах теплосиловой паротурбинной установки имеют место основные необратимые потери, и на конкретных примерах оценить порядок величины этих потерь.

Прежде всего следует упомянуть необратимые потери при течении пара в проточной части турбины (в сопловых аппаратах и на рабочих лопатках), которые обусловлены неизбежным трением в пограничном слое и другими гидродинамическими явлениями.

Процесс адиабатного течения протекает с увеличением энтропии. В случае, когда пар на выходе из турбины является влажным, температуры в конце процесса расширения будут одинаковыми и в обратимом (T_2), и в

необратимом ($T_{2д}$) процессах, поскольку процесс расширения происходит в обоих случаях до одного и того же давления p_2 , а в двухфазной области (влажный пар) изобара совпадает с изотермой. Это видно из рисунка 1.6, на котором изображен действительный процесс расширения пара в турбине в hs - и Ts -диаграммах.

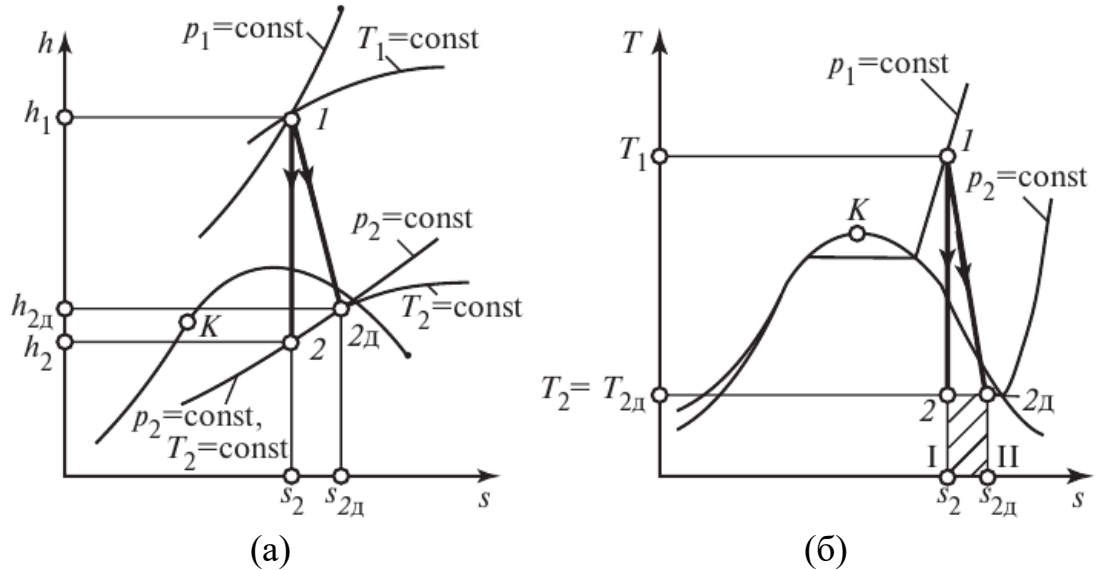


Рисунок 1.6 – Диаграммы hs (а) и Ts (б) процесса 1-2 реального цикла Ренкина.

Если бы процесс расширения пара в турбине был обратимым (отсутствие трения и других потерь), то в кинетическую энергию и, следовательно, в работу турбины был бы преобразован весь располагаемый перепад значений энтальпии:

$$l_T^{\text{теор}} = h_1 - h_2 \quad (10)$$

Вследствие же необратимых потерь, работа, получаемая в турбине, в действительном процессе расширения пара, составляет меньшую величину:

$$l_T^{\text{действ}} = h_1 - h_{2д} \quad (11)$$

Учитывая, что всегда $h_{2д} > h_2$, то $l_T^{\text{действ}} < l_T^{\text{теор}}$.

$$l_T^{\text{теор}} - l_T^{\text{действ}} = h_{2д} - h_2 = S_{I-2-2д-II-I} \quad (12)$$

где $S_{I-2-2д-II-I}$ – площадь фигуры I-2-2д-II-I на рисунке 1.6б.

В этом случае внутренний относительный КПД паровой турбины определяется выражением (13).

$$\eta_{oi} = \frac{h_1 - h_{2д}}{h_1 - h_2} \quad (13)$$

Отметим, что внутренний относительный КПД современных мощных паровых турбин высоких параметров составляет $\eta_{oi}^T = 0,85 \div 0,90$.

Аналогичным образом рассчитывается КПД насоса. Внутренний относительный КПД насоса составляет $\eta_{oi}^{нас} = 0,85 \div 0,90$, т.е. примерно равен η_{oi}^T .

Учитывая внутренние относительные КПД турбины и насоса, действительный КПД цикла Ренкина с перегревом пара имеет вид (14).

$$\eta_i = \frac{(h_1 - h_{2д}) - (h_{5д} - h_3)}{h_1 - h_{5д}} = \frac{l_{турб}^{действ} - l_{нас}^{действ}}{h_1 - h_{5д}} \quad (14)$$

Термический КПД идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), как было показано ранее, определяется соотношениями (8).

Учёт потерь на необратимость проводится аналогичным образом, как и для цикла Ренкина с перегревом пара, учитывая, что процессы адиабатного течения протекают с увеличением энтропии. Соответственно, работа турбины рассчитывается по формуле (15).[3]

$$l_T^{действ} = (h_1 - h_{2д}) + x_{2д} \cdot (h_4 - h_{5д}) \quad (15)$$

Работа насоса рассчитывается в соответствии с выражением (16) с учётом внутреннего относительного КПД насоса.[6]

$$l_{нас}^{действ} = 1,1107 \cdot \frac{p_1(\text{МПа})}{\eta_{oi}^{нас}} \quad (16)$$

Также доля пара, используемая на паро-паровой перегрев, будет вычисляться с учётом действительной степени сухости пара:

$$\alpha_{пп}^{действ} = x_{2д} \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h'_1} \quad (17)$$

Таким образом, выражение для действительного КПД цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) будет вычисляться по формуле (18).

$$\eta_i = \frac{l_{\text{Т}}^{\text{действ}} - l_{\text{нас}}^{\text{действ}}}{(1 + \alpha_{\text{пп}}^{\text{действ}})(h_1 - h_{8\text{д}})} \quad (18)$$

ГЛАВА 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОВ РЕНКИНА

2.1 Использование программного пакета для моделирования MATLAB

MATLAB (сокращение от англ. «Matrix Laboratory») – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений и одноимённый язык программирования, используемый в этом пакете. MATLAB является высокоуровневым интерпретируемым языком программирования, включающим основанные на матрицах структуры данных, широкий спектр функций, интегрированную среду разработки, объектно-ориентированные возможности и интерфейсы к программам, написанным на других языках программирования.[7]

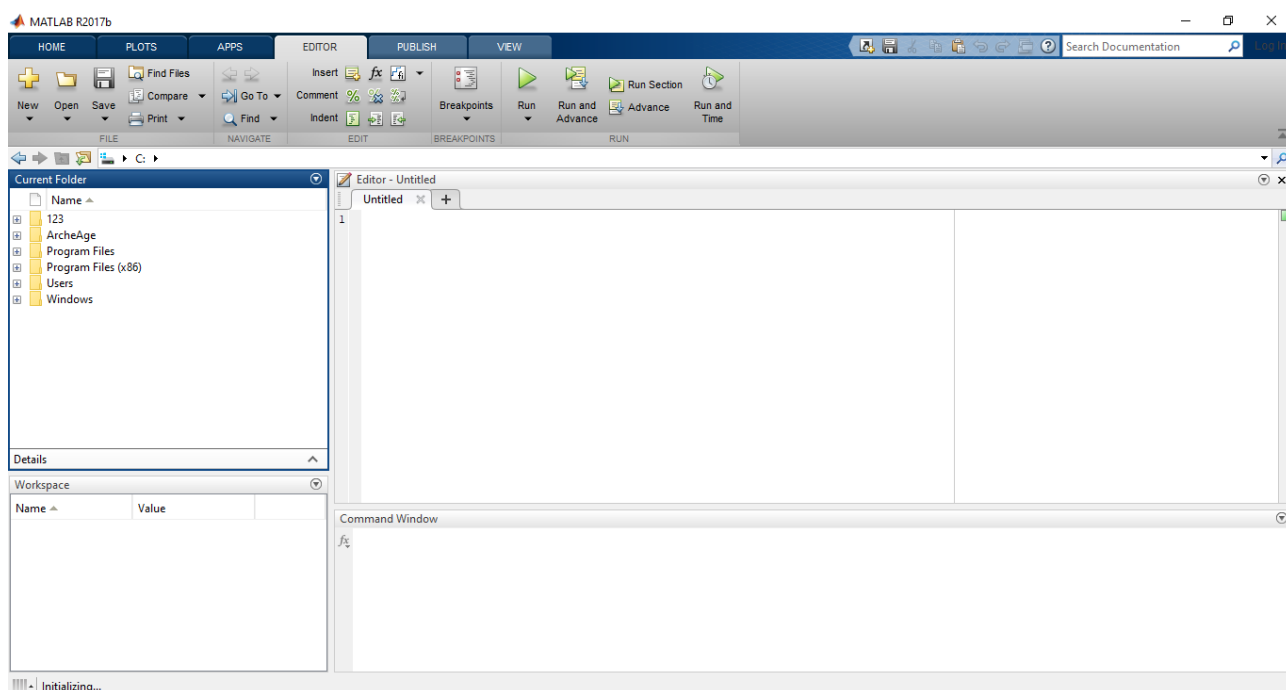


Рисунок 2.1 – Интерфейс программного пакета MATLAB

Данный программный пакет был выбран для моделирования циклов лабораторной работы не только ввиду его простоты в изучении и функциональности, но и благодаря возможности подключения дополнительных библиотек. Так, например, для реализации данных лабораторных работ была использована библиотека XSteam, которая содержит свойства пара и воды, расчёт которых основан на стандарте IAPWS IF-97 [8].

2.2 Моделирование идеального цикла Ренкина с перегревом пара

Исходными данными для расчёта КПД и построения идеального цикла Ренкина с перегревом пара являются:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: T_1, p_1 ;
- значение давления пара на входе в конденсатор: p_2 .

Известные параметры в контрольных точках идеального цикла Ренкина с перегревом пара, учитывая, что процессы 1-2, 3-5 – адиабатические; 5-4, 6-1, 2-3 – изобарные; 4-6, 2-3 – изотермические (в соответствии с рисунком 1.3):

- точка 1: T_1, p_1 ;
- точка 2: $p_2, s_2 = s_1$;
- точка 3: $T_3 = T_2, p_3 = p_2, x_3 = 0$;
- точка 5: $s_5 = s_3, p_5 = p_1, x_5 = 0$;
- точка 4: $p_4 = p_1, x_4 = 0$;
- точка 6: $T_6 = T_4, p_6 = p_1, x_6 = 1$.

Недостающие параметры в точках, такие как энтальпия (во всех точках) и энтропия (точки 3, 4, 6) рассчитывались с использованием библиотеки XSteam.

Термический КПД цикла Ренкина с перегревом пара был рассчитан по формулам (4), приведённым в главе 1.

2.3 Моделирование реального цикла Ренкина с перегревом пара

Исходными данными для расчёта КПД и построения реального циклов Ренкина с перегревом пара являются:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: T_1, p_1 ;
- значение давления пара на входе в конденсатор: p_2 ;
- внутренний относительный КПД турбины: η_{oi}^T ;
- внутренний относительный КПД насоса: $\eta_{oi}^{нас}$.

Известные параметры в контрольных точках реального цикла Ренкина с перегревом пара, учитывая, что процессы 1-2, 3-5 – адиабатические, но в реальном цикле происходят с увеличением энтропии; 5-4, 6-1, 2-3 – изобарные; 4-6, 2-3 – изотермические (в соответствии с рисунком 1.3):

- точка 1: T_1, p_1 ;
- точка 2: p_2 ;
- точка 3: $T_3 = T_2, p_3 = p_2, x_3 = 0$;
- точка 5: $p_5 = p_1, x_5 = 0$;
- точка 4: $p_4 = p_1, x_4 = 0$;
- точка 6: $T_6 = T_4, p_6 = p_1, x_6 = 1$.

Недостающие параметры в точках, такие как энтальпия (во всех точках) и энтропия (точки 2, 3, 4, 5, 6) рассчитывались с использованием библиотеки XSteam, а также с учётом потерь на необратимость, расчёт которых приведён в главе 1.

Для определения энтальпии в точках 2 и 5 реального цикла Ренкина с перегревом пара были использованы выражения (19) и (20), которые получены путём преобразования выражения (13).

$$h_{2д} = h_1 - (h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi}^T \quad (19)$$

где h_i – энтальпия в i -й точке цикла; $h_{ид}$ – действительная энтальпия в i -й точке цикла.

$$h_{5д} = h_3 + l_{нас}^{действ} \quad (20)$$

$$\text{где } l_{нас}^{действ} = 1,1107 \cdot \frac{p_1(\text{МПа})}{\eta_{oi}^{нас}} - \text{действительная работа насоса.}$$

Действительный КПД цикла Ренкина с перегревом пара был рассчитан по формуле (14), приведённой в главе 1.

2.4 Моделирование идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР

В связи со скорым введением в эксплуатацию Белорусской АЭС в г. Островец, энергоблоками которой являются 2 реактора ВВЭР-1200, представляется необходимым провести моделирование термодинамического цикла для энергетической установки данного типа, которым является цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР).

Исходными данными для расчёта КПД и построения идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) являются:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: T_1 , p_1 , x_1 ;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: p_2 ;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: T_4 ;
- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: p_5 .

Известные параметры в контрольных точках идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), учитывая, что процессы 1-2, 4-5, 7-8 – адиабатические; 3-4, 6-7, 8-9 – изобарные; 9-1, 2-3, 5-6 – изотермические (в соответствии с рисунком 1.5):

- точка 1: T_1 , p_1 , x_1 ;

- точка 2: $p_2, s_2 = s_1$;
- точка 3: $T_3 = T_2, p_3 = p_2, x_3 = 1$;
- точка 4: $T_4, p_4 = p_3$;
- точка 5: $p_5, s_5 = s_4$;
- точка 6: $T_6 = T_5, p_6 = p_5, x_6 = 0$;
- точка 8: $s_8 = s_7, p_8 = p_1$;
- точка 9: $T_9 = T_1, p_9 = p_1, x_9 = 0$.

Недостающие параметры в контрольных точках, такие как энтальпия (во всех точках) и энтропия (точки 3, 4, 6, 9) рассчитывались с использованием библиотеки XSteam.

Термический КПД цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) был рассчитан по формулам (9), приведённым в главе 1.

2.5 Моделирование реального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР

Исходными данными для расчёта КПД и построения реального цикла Ренкина с перегревом пара являются:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: T_1, p_1, x_1 ;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: p_2 ;
- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{ЦВД}$;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: T_4 ;
- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: p_5 ;
- внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{ЦНД}$;
- внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{нас}$.

Известные параметры в контрольных точках реального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), учитывая, что процессы 1-2, 4-5, 7-8 – адиабатические, но в реальном цикле происходят с увеличением энтропии; 3-4, 6-7, 8-9 – изобарные; 9-1, 2-3, 5-6 – изотермические (в соответствии с рисунком 1.5):

- точка 1: T_1, p_1, x_1 ;
- точка 2: p_2 ;
- точка 3: $T_3 = T_2, p_3 = p_2, x_3 = 1$;
- точка 4: $T_4, p_4 = p_3$;
- точка 5: p_5 ;
- точка 6: $T_6 = T_5, p_6 = p_5, x_6 = 0$;
- точка 7: $p_7 = p_6$;
- точка 8: $p_8 = p_1$;
- точка 9: $T_9 = T_1, p_9 = p_1, x_9 = 0$.

Недостающие параметры в точках, такие как энтальпия (во всех точках) и энтропия (точки 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9) рассчитывались с использованием библиотеки XSteam, а также с учётом потерь на необратимость, расчёт которых приведён в главе 1.

Для определения энтальпии в точках 2, 5, 7, 8 реального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) были использованы выражения (21)-(24).

$$h_{2д} = h_1 - (h_1 - h_2) \cdot \eta_{oi}^{ПВД} \quad (21)$$

где h_i – энтальпия в i -й точке цикла; $h_{iд}$ – действительная энтальпия в i -й точке цикла.

$$h_{5д} = h_4 - (h_4 - h_5) \cdot \eta_{oi}^{ПНД} \quad (22)$$

$$h_{7д} = \frac{x_{2д} \cdot h_6 + (1 - x_{2д}) \cdot h'_2 + \alpha_{ппд} \cdot h'_1}{1 + \alpha_{ппд}} \quad (23)$$

где $x_{2д}$ – степень сухости пара в точке 2 реального цикла; h'_i – энтальпия в точке, соответствующей p_i и степени сухости пара 0; $\alpha_{ппд}$ – действительная доля расхода пара на паро-паровой перегрев.

$$h_{8д} = h_{7д} + l_{нас}^{действ} \quad (24)$$

где $l_{нас}^{действ} = 1,1107 \cdot \frac{p_1(\text{МПа})}{\eta_{oi}^{нас}}$ – действительная работа насоса.

Действительный КПД цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) был рассчитан по формуле (18), приведённой в главе 1.

ГЛАВА 3 РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1 Результаты моделирования цикла Ренкина с перегревом пара

Используя программный пакет MATLAB, были построены идеальный и реальный циклы Ренкина с перегревом пара с набором начальных параметров «A1» [6]:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: $T_1 = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_1 = 12,5\text{ МПа}$;
- значение давления пара на входе в конденсатор: $p_2 = 4\text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД турбины: $\eta_{oi}^T = 89\%$;
- внутренний относительный КПД насоса: $\eta_{oi}^{\text{нас}} = 80\%$.

Результаты построения циклов представлены на рисунке 3.1.

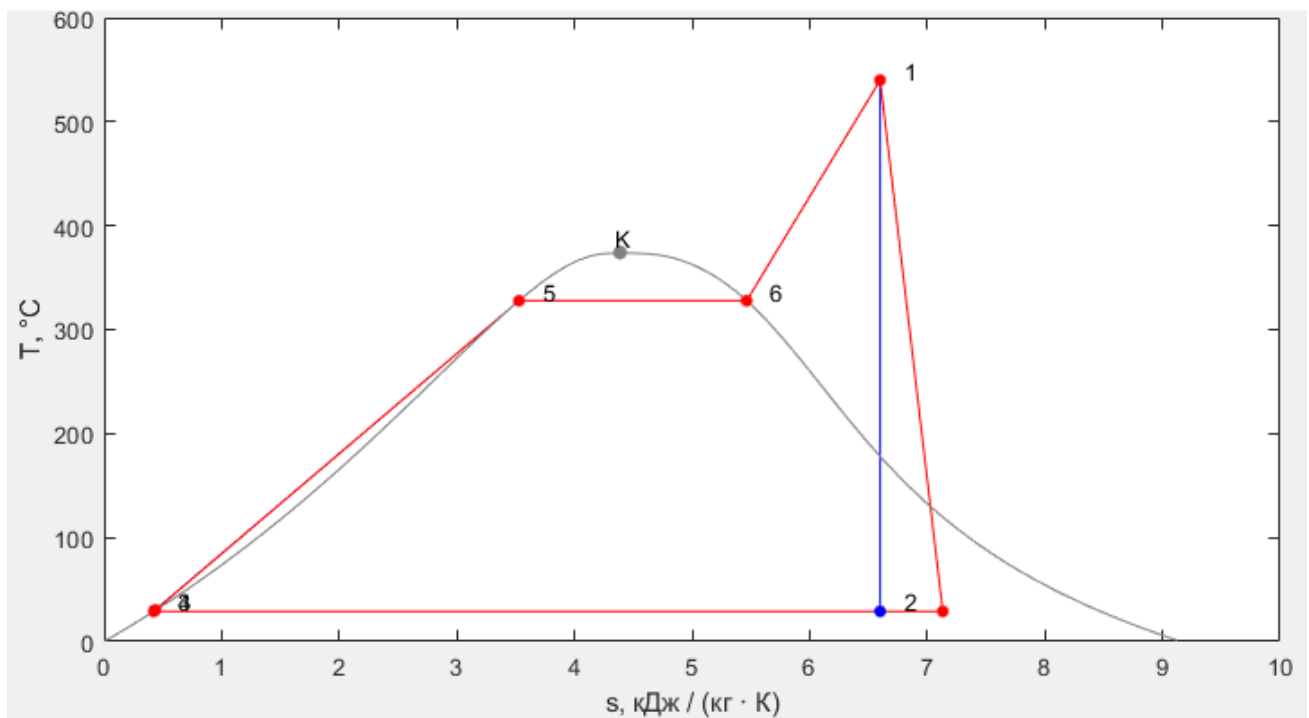


Рисунок 3.1 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара с набором начальных параметров «A1»

При наборе начальных параметров «A1» КПД идеального и реального циклов составили 43,71% и 39,79% соответственно.

Уменьшив значения внутреннего относительного КПД турбины, по сравнению с набором «A1», был получен набор начальных параметров «A2»:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: $T_1 = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_1 = 12,5\text{ МПа}$;
- значение давления пара на входе в конденсатор: $p_2 = 4\text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД турбины: $\eta_{oi}^T = 75\%$;
- внутренний относительный КПД насоса: $\eta_{oi}^{nac} = 80\%$.

Результаты построения циклов представлены на рисунке 3.2.

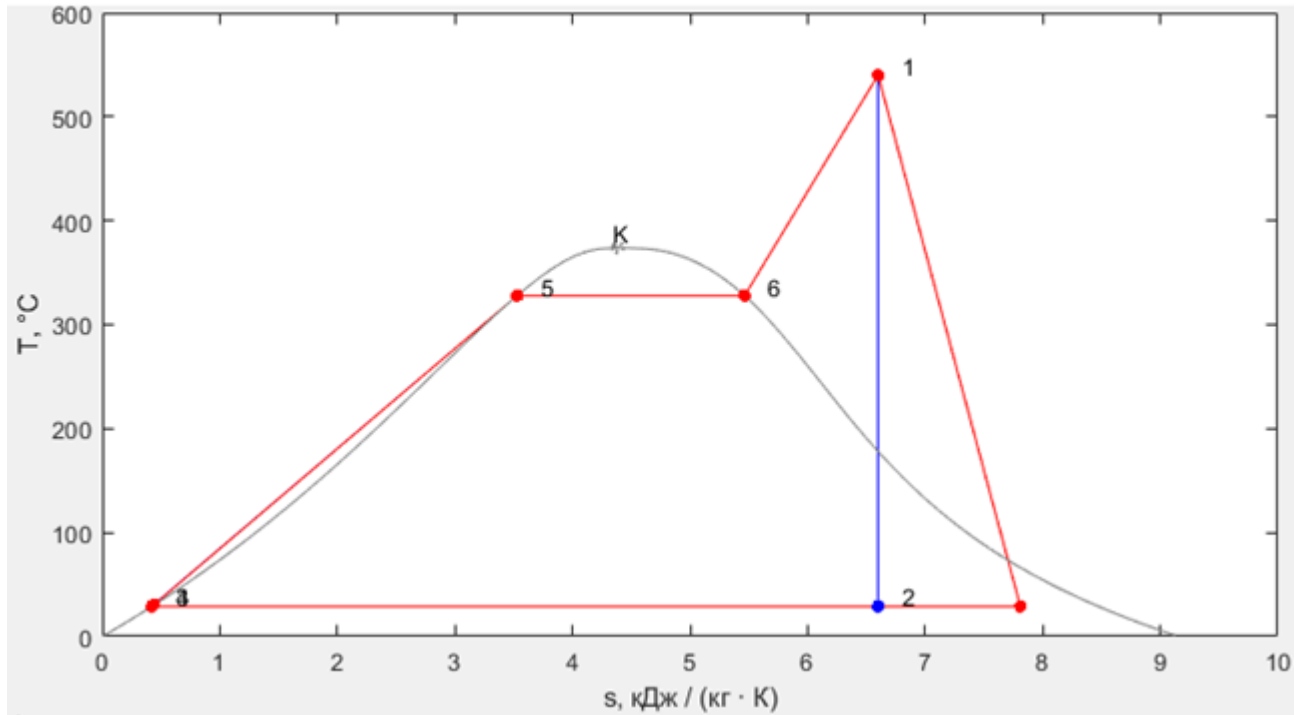


Рисунок 3.2 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара с набором начальных параметров «А2»

При наборе начальных параметров «А2» КПД идеального и реального циклов составили 43,71% и 32,60% соответственно.

Уменьшив значения внутреннего относительного КПД насоса, по сравнению с набором «А1», был получен набор начальных параметров «А3»:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: $T_1 = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_1 = 12,5\text{ МПа}$;
- значение давления пара на входе в конденсатор: $p_2 = 4\text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД турбины: $\eta_{oi}^T = 89\%$;
- внутренний относительный КПД насоса: $\eta_{oi}^{nac} = 70\%$.

Результаты построения циклов представлены на рисунке 3.3.

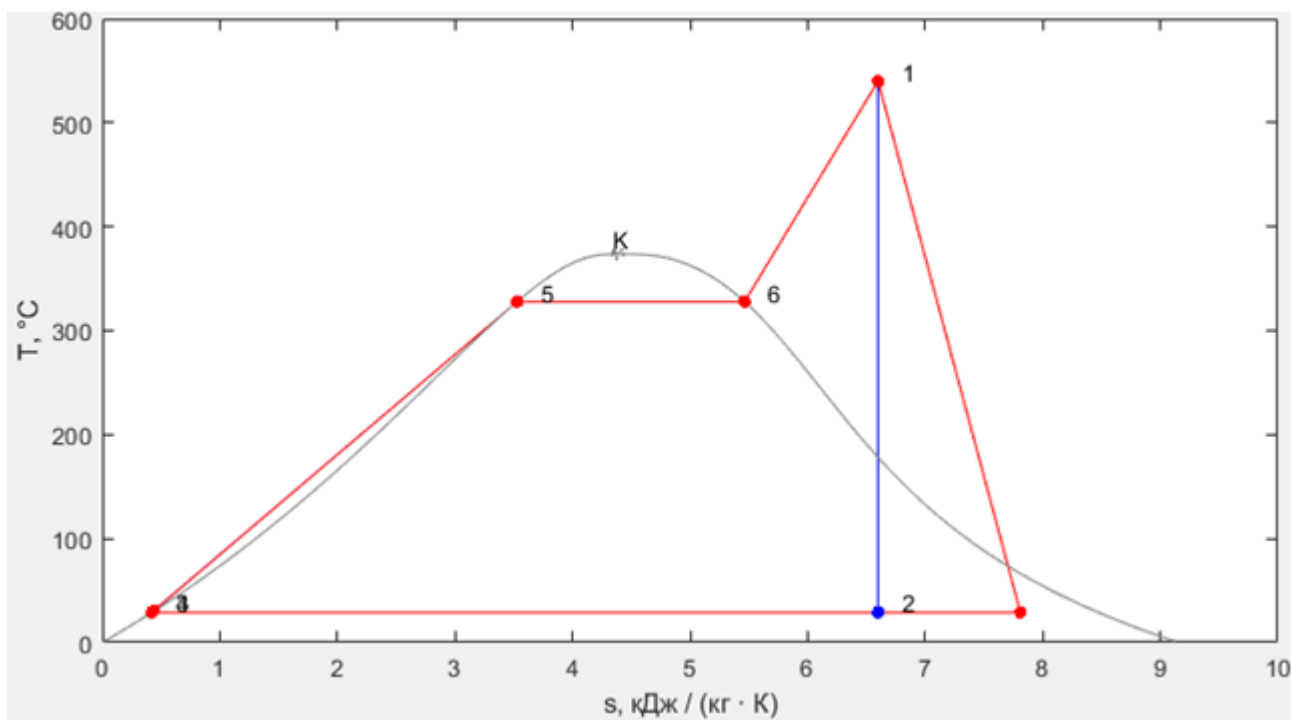


Рисунок 3.3 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара с набором начальных параметров «А3»

При наборе начальных параметров «А3» КПД идеального и реального циклов составили 43,71% и 38,74% соответственно.

При сравнении значений КПД циклов при наборах начальных параметров «А2» и «А3» со значениями, полученными при наборе начальных параметров «А1», можно сделать вывод, что уменьшение значений внутренних относительных КПД турбины и насоса не оказало влияния на вид идеального цикла и термический КПД, но изменило вид реального цикла и уменьшило значение действительного КПД.

Это объясняется тем, что термический КПД цикла не зависит от внутренних относительных КПД турбины и насоса, а только от термодинамических параметров цикла.[9]

Уменьшив значение давления пара на входе в конденсатор с 4 до 3 кПа, получен набор начальных параметров «А4»:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: $T_1 = 540\text{ °C}$, $p_1 = 12,5\text{ МПа}$;
- значение давления пара на входе в конденсатор: $p_2 = 3\text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД турбины: $\eta_{oi}^T = 75\%$;
- внутренний относительный КПД насоса: $\eta_{oi}^{\text{нас}} = 75\%$.

Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.3.

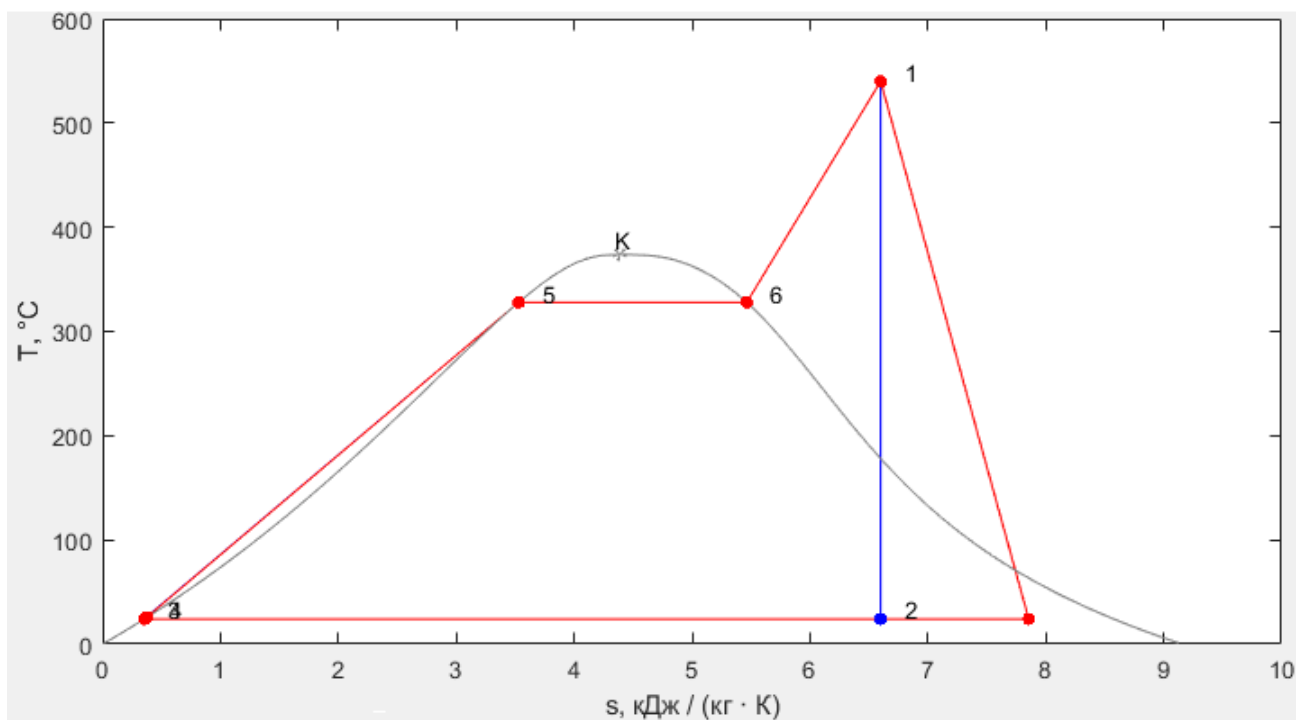


Рисунок 3.4 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара с набором начальных параметров «А4»

При наборе начальных параметров «А4» КПД идеального и реального циклов составили 44,35% и 33,06% соответственно.

Сравнивая значения КПД при наборах начальных параметров «А1» и «А4», можно увидеть, что уменьшение значения давления на входе в конденсатор увеличивает значения КПД как реального, так и идеального циклов.

Это объясняется тем, что понижение давления в конденсаторе значительно уменьшает среднеинтегральную температуру отвода тепла и увеличивает адиабатное теплопадение энтальпии, следовательно, и КПД циклов.[9]

Увеличив значения начальных температуры и давления на выходе из нагревателя по сравнению с набором начальных параметров «А1», был получен набор начальных параметров «А5» [3]:

- значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя: $T_1 = 550 \text{ °C}$, $p_1 = 16,67 \text{ МПа}$;
- значение давления пара на входе в конденсатор: $p_2 = 4 \text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД турбины: $\eta_{oi}^T = 89\%$;
- внутренний относительный КПД насоса: $\eta_{oi}^{\text{нас}} = 80\%$.

Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.4.

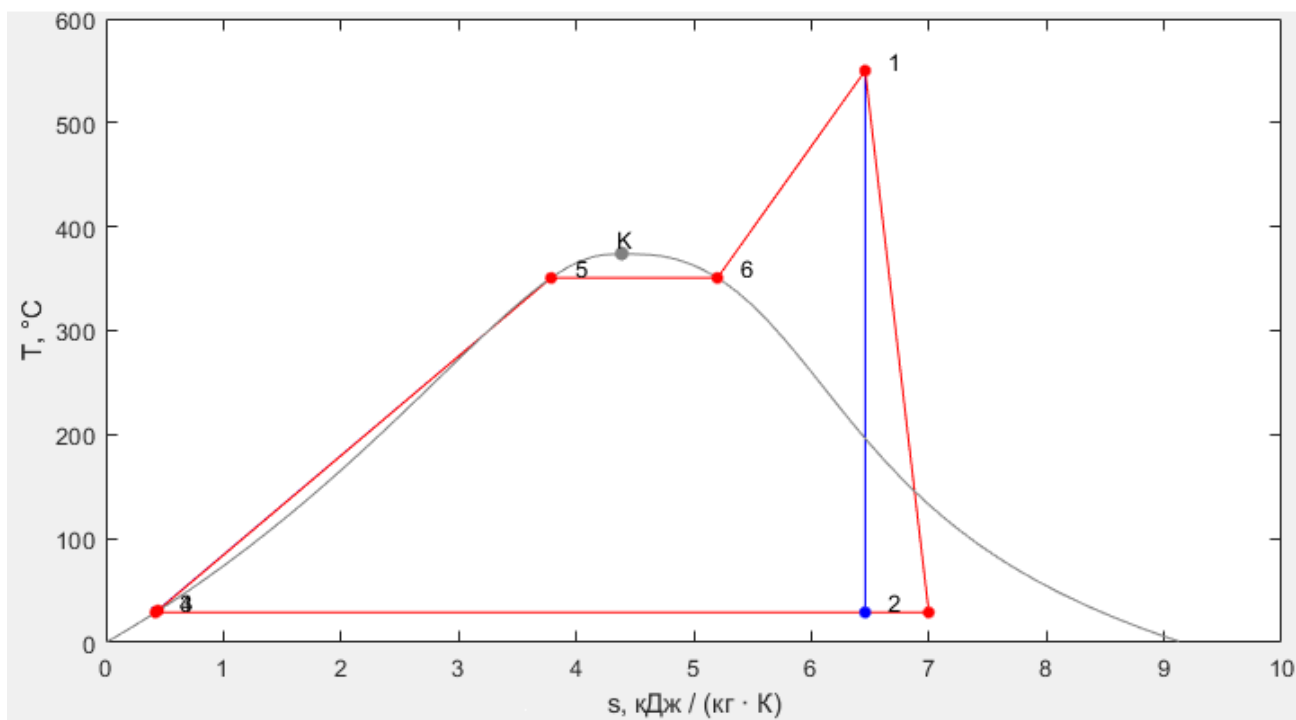


Рисунок 3.5 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара с набором начальных параметров «А5»

При наборе начальных параметров «А5» КПД идеального и реального циклов составили 44,63% и 39,57% соответственно.

Значения термического и действительного КПД при увеличении значений начальных температуры и давления на выходе из нагревателя стали выше.

Это объясняется тем, что увеличение значений давления и температуры на выходе из нагревателя увеличивает среднеинтегральную температуру подвода теплоты, что в свою очередь увеличивает адиабатное теплопадение энтальпии, которое приводит к увеличению КПД.[9]

3.2 Результаты моделирования цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для реактора ВВЭР

Используя программный пакет MATLAB, были построены идеальный и реальный циклы Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с набором начальных параметров «Б1» [6]:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: $T_1 = 278 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_1 = 6,2 \text{ МПа}$, $x_1 = 100\%$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{\text{ЦВД}} = 89\%$;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: $T_4 = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$;

- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 3$ кПа;
 - внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{цнд} = 86\%$;
 - внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{нас} = 80\%$.
- Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.6.

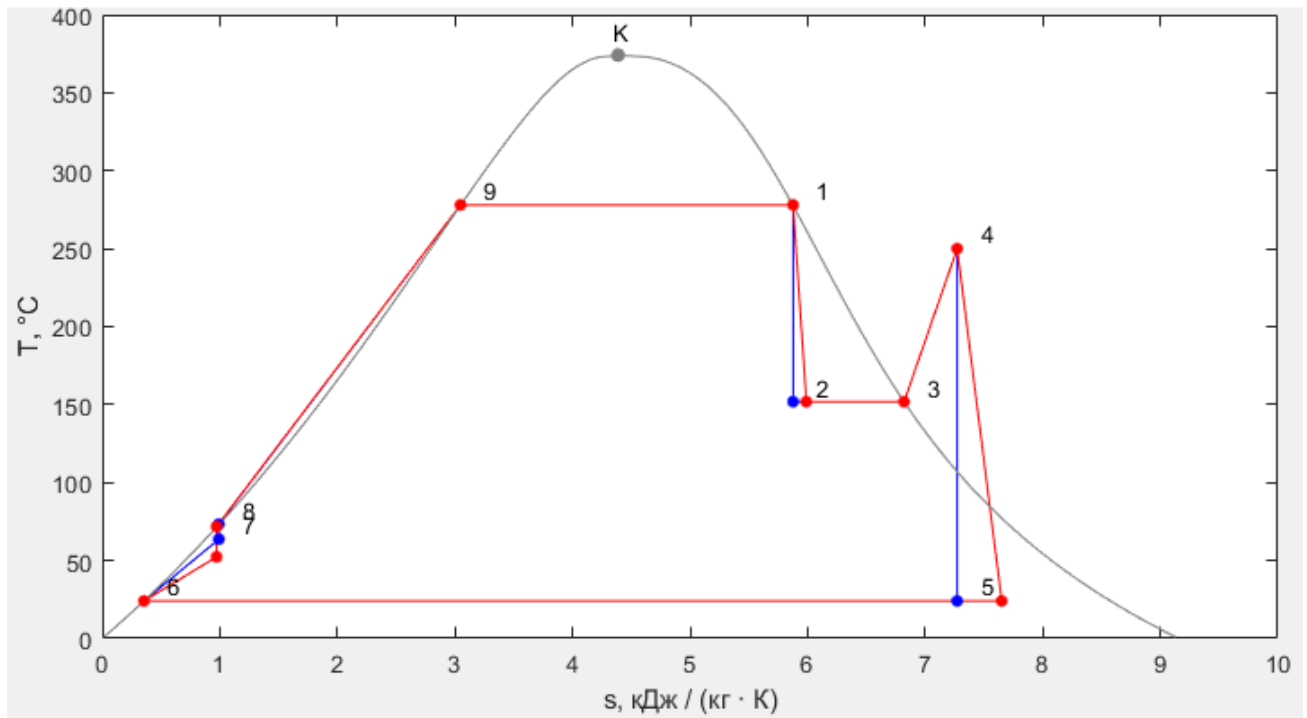


Рисунок 3.6 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с набором начальных параметров «Б1»

При наборе начальных параметров «Б1» КПД идеального и реального циклов составили 39,34% и 34,59% соответственно.

Уменьшив значения внутреннего относительного КПД ЦВД, по сравнению с набором «Б1», получим набор начальных параметров «Б2»:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: $T_1 = 278$ °С, $p_1 = 6,2$ МПа, $x_1 = 100\%$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: $p_2 = 0,5$ МПа;
- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{цвд} = 70\%$;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: $T_4 = 250$ °С;
- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 3$ кПа;

- внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{цнд} = 86\%$;
 - внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{нас} = 80\%$.
- Результаты построения циклов представлено на рисунке 3.7.

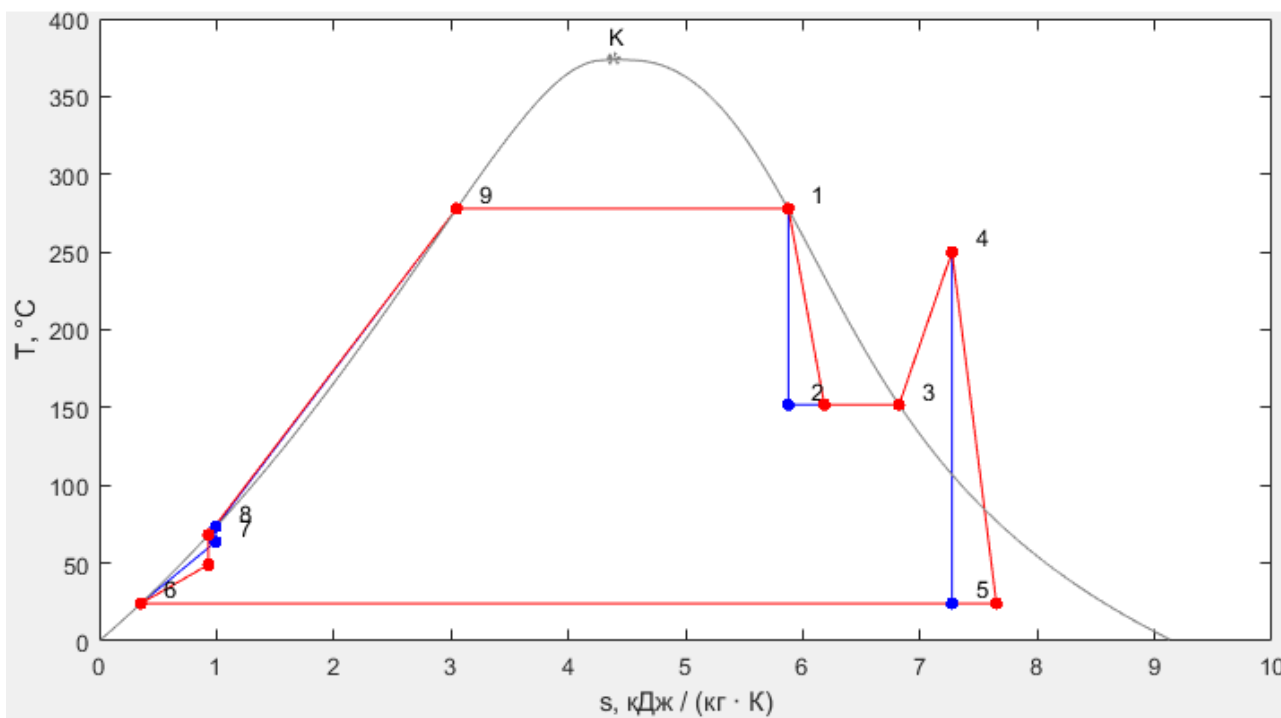


Рисунок 3.7 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с набором начальных параметров «Б2»

При наборе начальных параметров «Б2» КПД идеального и реального циклов составили 39,34% и 32,23% соответственно.

Уменьшив значения внутренних относительных КПД ЦНД, по сравнению с набором «Б1», получим набор начальных параметров «Б3»:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: $T_1 = 278\text{ °C}$, $p_1 = 6,2\text{ МПа}$, $x_1 = 100\%$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: $p_2 = 0,5\text{ МПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{цвд} = 89\%$;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: $T_4 = 250\text{ °C}$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 3\text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{цнд} = 70\%$;
- внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{нас} = 80\%$.

Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.8.

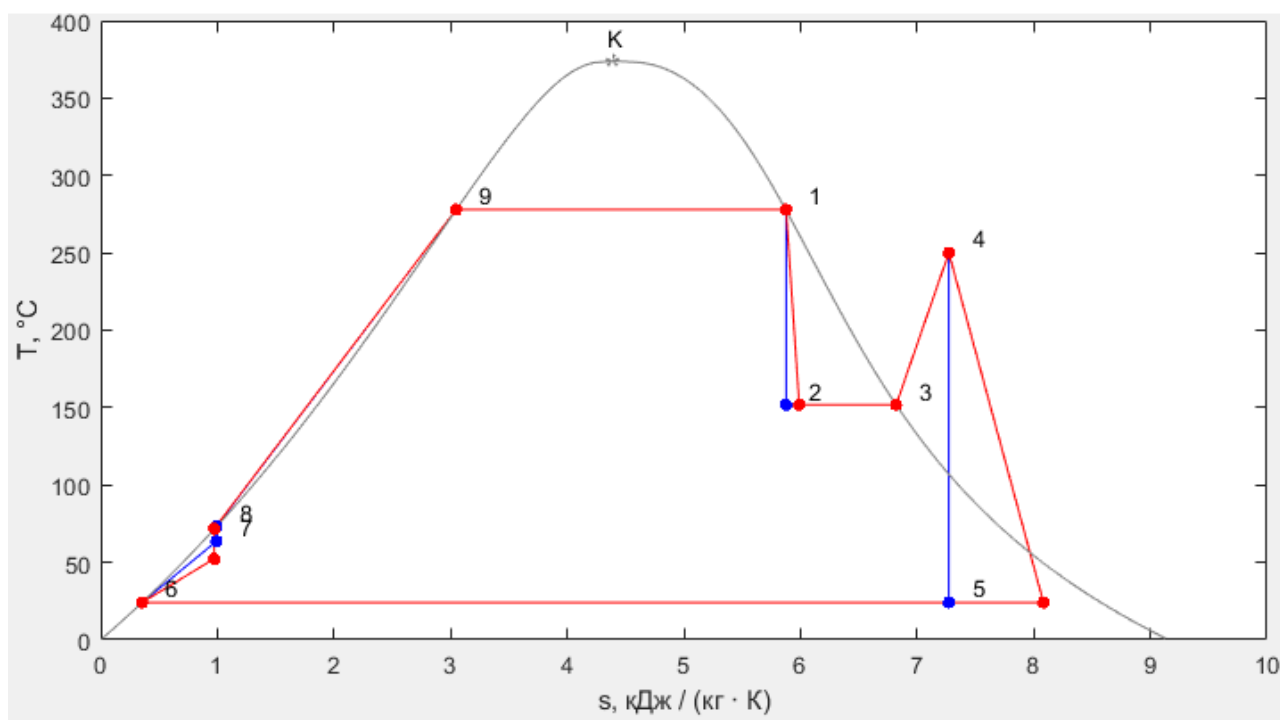


Рисунок 3.8 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с набором начальных параметров «Б3»

При наборе начальных параметров «Б3» КПД идеального и реального циклов составили 39,34% и 30,71% соответственно.

Уменьшив значение внутреннего относительного КПД насоса, по сравнению с набором «Б1», получим набор начальных параметров «Б4»:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: $T_1 = 278 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_1 = 6,2 \text{ МПа}$, $x_1 = 100\%$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{\text{ЦВД}} = 89\%$;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: $T_4 = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 3 \text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{\text{ЦНД}} = 86\%$;
- внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{\text{нас}} = 70\%$.

Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.9.

- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 3 \text{ кПа}$;
 - внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{\text{ЦНД}} = 86\%$;
 - внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{\text{нас}} = 80\%$.
- Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.10.

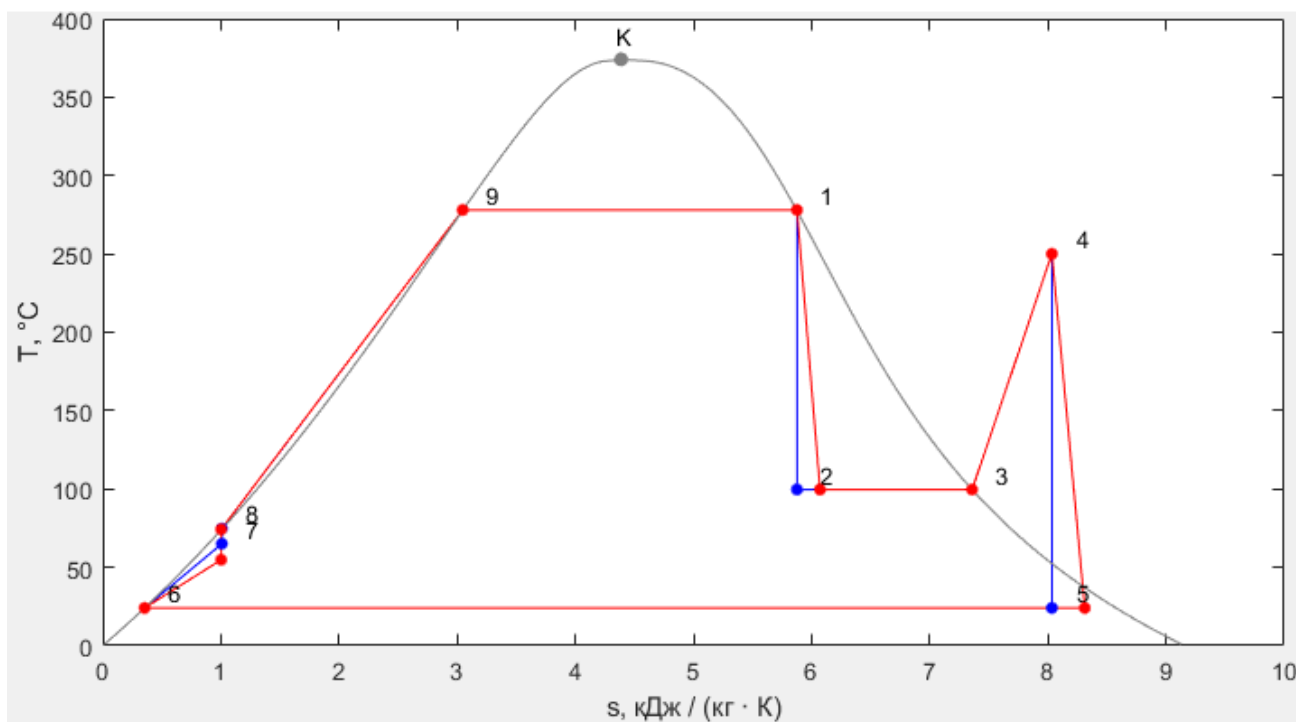


Рисунок 3.10 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с набором начальных параметров «Б5»

При наборе начальных параметров «Б5» КПД идеального и реального циклов составили 38,94% и 34,46% соответственно.

Уменьшение значения давления на выходе из ЦВД приводит к уменьшению термического и действительного КПД цикла.

Это объясняется тем, что, с одной стороны, уменьшение выходного давления ЦВД приводит к увеличению механической работе, выполняемой турбиной, но, с другой стороны, увеличение количества теплоты, необходимой для перегрева пара, приводит к уменьшению КПД циклов.

Уменьшив значение температуры пара на выходе из пароперегревателя, был получен набор начальных параметров «Б6»:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: $T_1 = 278 \text{ °C}$, $p_1 = 6,2 \text{ МПа}$, $x_1 = 100\%$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$;

- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{ЦВД} = 89\%$;
 - значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: $T_4 = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
 - значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 3\text{ кПа}$;
 - внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{ЦНД} = 86\%$;
 - внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{нас} = 80\%$.
- Результаты построения циклов представлен на рисунке 3.11.

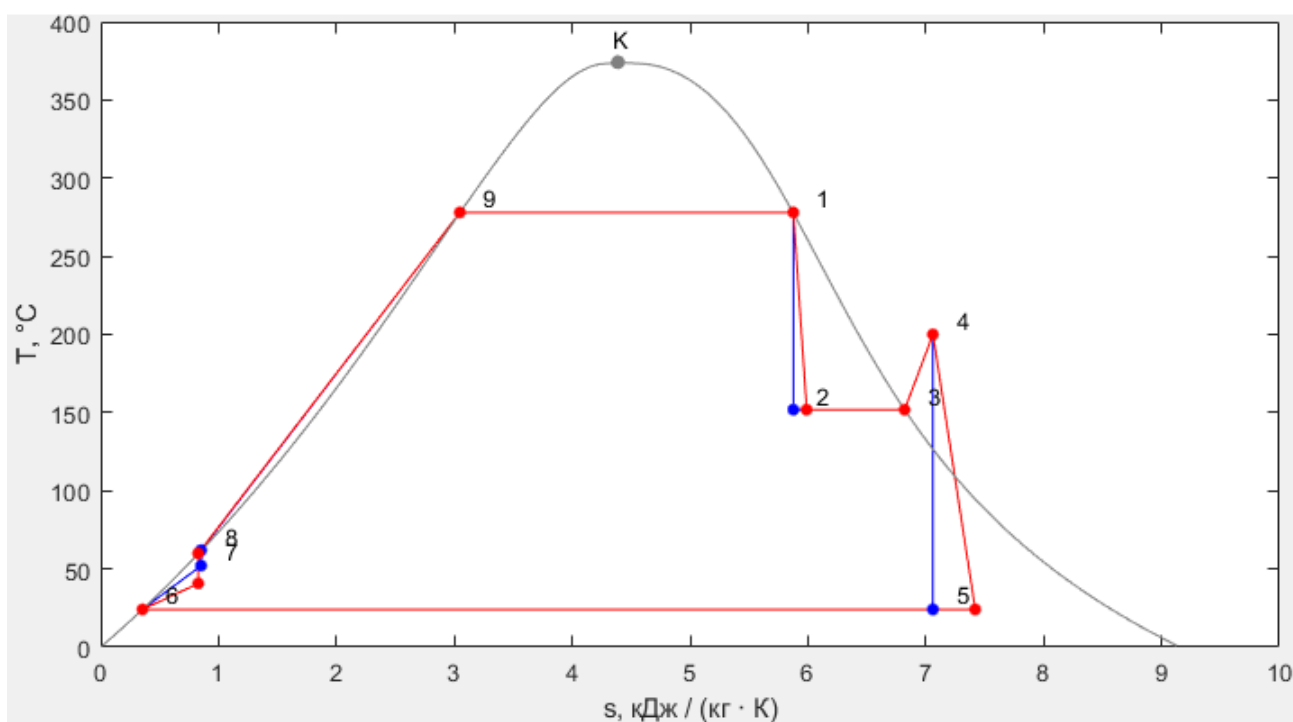


Рисунок 3.11 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с набором начальных параметров «Б6»

При наборе начальных параметров «Б6» КПД идеального и реального циклов составили 39,30% и 34,58% соответственно.

При сравнении полученных значений КПД со значениями КПД при наборе начальных параметров «Б1» видно, что уменьшение температуры на выходе из пароперегревателя приводит к уменьшению значений КПД: как термического, так и реального.

Это объясняется тем, что уменьшение значения температуры на выходе из пароперегревателя уменьшает среднеинтегральную температуру подвода теплоты, что в свою очередь уменьшает адиабатное теплопадение энтальпии, которое приводит к уменьшению КПД.[9]

Дополнительно были построены циклы с набором начальных параметров «Б7» (параметры работы Ровненской АЭС, Украина) [10]:

- значения температуры, давления и степени сухости пара на выходе из парогенератора: $T_1 = 274\text{ }^{\circ}\text{C}$, $p_1 = 5,85\text{ МПа}$, $x_1 = 99,5\%$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров высокого давления: $p_2 = 0,49\text{ МПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров высокого давления: $\eta_{oi}^{\text{ЦВД}} = 79,5\%$;
- значение температуры пара на выходе из пароперегревателя: $T_4 = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- значение давления пара на выходе из цилиндров низкого давления: $p_5 = 4,3\text{ кПа}$;
- внутренний относительный КПД цилиндров низкого давления: $\eta_{oi}^{\text{ЦНД}} = 82\%$;
- внутренний относительный КПД питательного насоса: $\eta_{oi}^{\text{нас}} = 80\%$.

Результаты построения циклов представлено на рисунке 3.12.

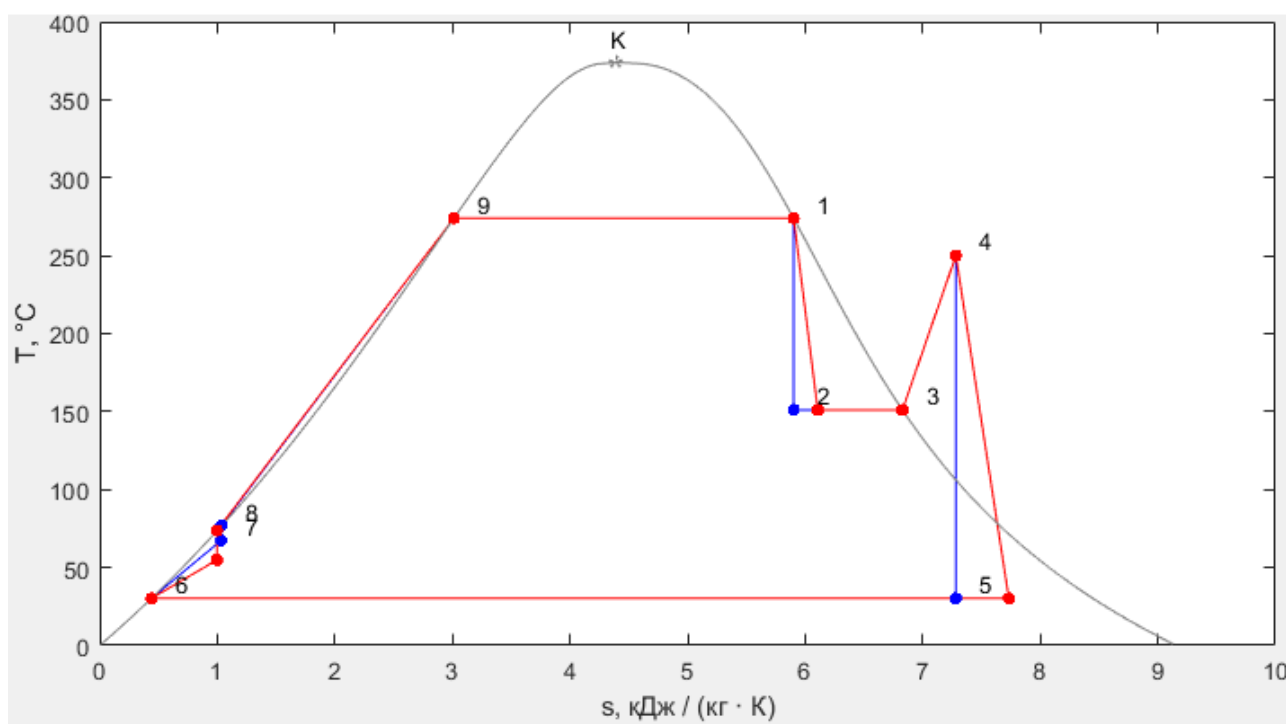


Рисунок 3.12 – Результаты построения идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара с набором начальных параметров «Б7»

При наборе начальных параметров «Б7» КПД идеального и реального циклов составили 37,99% и 31,28% соответственно.

Набор начальных параметров «Б7» позволяет построить цикл работы реальной АЭС и определяет действительные КПД АЭС, что позволяет проводить сравнение этих значений с КПД других энергетических установок.

3.3 Степень внедрения

Полученные результаты лягут в основу модельной лабораторной работы цикла «Тепловые схемы и режимы работы ядерных энергетических установок» для студентов специализации 1-31 04 06 03 «Физика ядерных реакторов и атомных энергетических установок» специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) В ходе выполнения дипломного исследования разработана модельная лабораторная работа для аналитического изучения циклов Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара с учётом и без учёта потерь от необратимости, в результате выполнения которой студенты смогут:

а) провести исследование зависимости термического и действительного КПД циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) от:

- выходных значений температуры и давления пара;
- значений температуры перегретого пара;
- внутренних относительных КПД цилиндров низкого и высокого давления турбины, а также питательного насоса;
- значений давления пара на входе в конденсатор;

б) провести сравнительный анализ особенностей энергетических установок, работающих на основе циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР);

в) провести сравнительный анализ параметров циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) паротурбинных установок с учётом и без учёта потерь от необратимости;

г) овладеть навыками анализа энергоэффективности паротурбинных установок при варьировании их различных параметров для нахождения оптимального режима работы данных энергетических установок в установленных условиях.

2) Расчеты в рамках разработанной лабораторной работы показывают, что:

а) значение термического КПД цикла Ренкина с перегревом пара, полученное при начальных параметрах $T_1 = 550^\circ\text{C}$, $p_1 = 16,67 \text{ МПа}$, $p_2 = 4,0 \text{ кПа}$, составляет $\eta_t = 0,45$ и совпадает с данными известных учебных литературных источников [3];

б) значения КПД цикла Ренкина с перегревом пара, рассчитанные при одних и тех же начальных параметрах цикла, выше по сравнению с циклом Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), как для идеального (в частности, $0,43 > 0,39$), так и для реального (в частности, $0,39 > 0,35$) циклов Ренкина, что полностью соответствует результатам термодинамического анализа энергетических установок данного типа;

в) значения КПД идеальных циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) не зависят от

внутренних относительных КПД турбины (цилиндров высокого и низкого давления турбины) и насоса, а только от термодинамических параметров цикла, что в точности согласуется с теорией реализации циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР) с учётом потерь от необратимости;

г) увеличение значений температуры и давления на выходе из нагревателя (парогенератора), значений температуры на выходе из пароперегревателя увеличивает значения КПД как реального, так и идеального циклов Ренкина с перегревом пара и промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР), что согласуется с известными результатами термодинамического анализа данных циклов [9].

Приведённые выше результаты моделирования показывают, что расчет КПД энергетических установок различного типа, выполненный с помощью разработанного для данной лабораторной работы программного обеспечения, приводит к верному результату, что доказывает ее практическую корректность и методическую важность для студентов, обучающихся по специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии».

3) В результате выполнения дипломного исследования разработаны методические указания к лабораторной работе «Анализ цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара», которые приведены в приложении А.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Energy Agency. World Energy Outlook 2016 Executive Summary / International Energy Agency. – 2016.
2. R.K. Kapooria. An analysis of a thermal power plant working on a Rankine cycle: A theoretical investigation / R.K. Kapooria, S. Kumar, K.S. Kasana // J. Energy South. Afr. – 2008. – Т. 19, № 1. – С. 77-83.
3. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика: учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. – 495 с.
4. Чухин, И.М. Техническая термодинамика. Часть 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ispu.ru/files/u2/book2/TD2_19-06/index.htm. – Дата доступа: 20.04.2019.
5. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок: учебное пособие для вузов / А.А. Александров. – Москва : Издательский дом МЭИ, 2016. – 157 с.
6. Расчет и графическая иллюстрация основных термодинамических циклов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://twi.mpei.ac.ru/ТТНВ/2/tdc.html>. – Дата доступа: 19.04.2019.
7. Михайлов Е. MatLab. Руководство для начинающих [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rsc.chemometrics.ru/Tutorials/matlab.htm>. – Дата доступа: 10.04.2019.
8. International Association for the Properties of Water and Steam. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam / International Association for the Properties of Water and Steam. – 2007.
9. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: учебное пособие для неэнергетических специальностей вузов / Нащокин В.В. – Москва : Высшая школа, 1975. – 496 с.
10. Ровненская АЭС в энергетике Украины. – ОП «Ровненская АЭС», 2014.

Методические указания к лабораторной работе «Анализ цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара»

Тема: Анализ цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара.

Цель:

- изучить принцип работы энергетических установок, работающих по циклу Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара, с учётом и без учёта потерь от необратимости;
- провести моделирование цикла Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара с помощью программного обеспечения в среде MATLAB;
- определить коэффициенты полезного действия циклов Ренкина с перегревом и промежуточным перегревом пара при различных параметрах рабочей среды, а также термодинамические характеристики в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина.

А1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

А1.1 Цикл Ренкина

На современных тепловых электростанциях большой мощности превращение теплоты в работу производится в циклах, в которых в качестве основного рабочего тела используется водяной пар высокого давления и температуры. Водяной пар производят в парогенераторах.

Термодинамический цикл преобразования теплоты в работу с помощью водяного пара был предложен в середине XIX физиками Ренкиным и Клаузиусом. Принципиальная тепловая схема энергетической установки, работающей по циклу Ренкина, показана на рисунке А1.

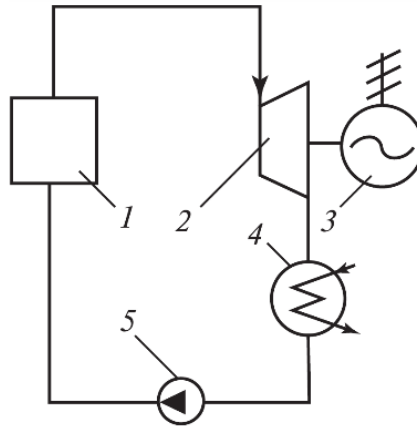


Рисунок А1 – Принципиальная тепловая схема электростанции, работающей по циклу Ренкина, где:

- 1 – парогенератор;
- 2 – турбина;
- 3 – электрогенератор;
- 4 – конденсатор;
- 5 – насос.

Вода нагнетается в парогенератор 1 насосом 5 и за счет теплоты превращается в водяной пар, который затем поступает в турбину 2, вращающую электрогенератор 3. Тепловая энергия пара преобразуется в турбине в механическую работу, которая, в свою очередь, преобразуется в генераторе в электроэнергию. Из турбины отработанный пар поступает в конденсатор 4. В конденсаторе пар превращается в воду (конденсируется), которая с помощью насоса 5 вновь подается в парогенератор.

Цикл Ренкина в Ts -диаграмме изображен на рисунке А2.

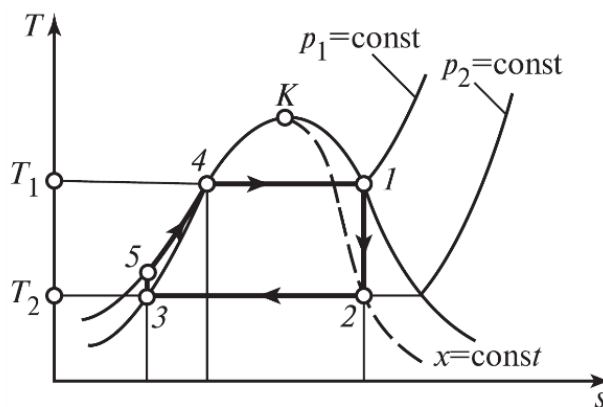


Рисунок А2 – Ts -диаграмма цикла Ренкина, где:

- 5-4 – нагрев воды в котле до кипения;
- 4-1 – процесс парообразования;

- 1-2 – расширение пара в турбине;
- 2-3 – конденсация пара;
- 3-5 – сжатие воды насосом.

Влажный пар после турбины поступает в конденсатор и полностью в нём конденсируется при давлении $p_2 = \text{const}$ (процесс 2-3).

Затем вода сжимается насосом от давления p_2 до давления p_1 , этот адиабатный процесс показан в Ts -диаграмме вертикальным отрезком 3-5. Отметим, что длина отрезка 3-5 весьма мала; в области жидкости изобары в Ts -диаграмме проходят очень близко друг от друга, поэтому зачастую при изображении цикла Ренкина в Ts -диаграмме изобары в области жидкости сливаются с левой пограничной кривой и отрезком 3-5 пренебрегают.

Из насоса вода под давлением p_1 поступает в котел, где к ней в изобарном процессе $p_1 = \text{const}$ подводится теплота. Вначале вода в котле нагревается до кипения (участок 5-4 изобары $p_1 = \text{const}$), а затем, по достижении температуры кипения, происходит изотермический и изобарный процесс парообразования (участок 4-1 изобары $p_1 = \text{const}$).

Сухой насыщенный пар, получаемый в котле, поступает в турбину. Адиабатное расширение пара в турбине 1-2 – процесс получения работы в цикле.

Отработанный влажный пар поступает в конденсатор, и цикл замыкается.

A1.2 Цикл Ренкина с перегревом пара

Для того чтобы увеличить термический КПД цикла Ренкина и закончить процесс расширения пара в турбине в области более высокой степени сухости, чтобы условия работы проточной части турбины оказались более легкими, применяют так называемый перегрев пара.

В этом случае средняя температура подвода теплоты увеличивается по сравнению с температурой подвода теплоты в цикле без перегрева и, следовательно, термический КПД цикла возрастает.

Цикл Ренкина с перегретым паром в Ts -диаграмме показан на рисунке А3.

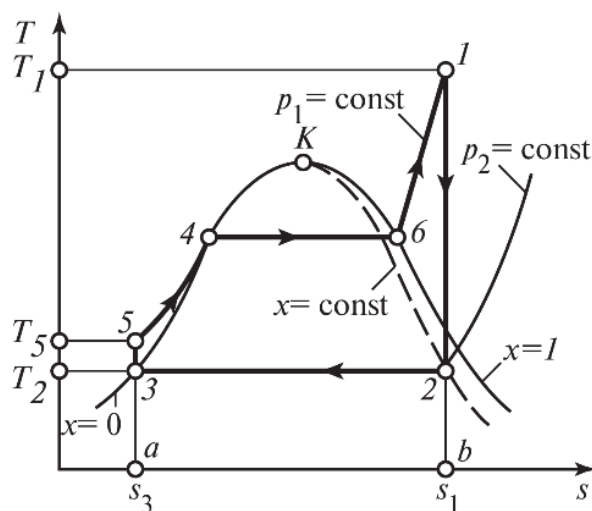


Рисунок А3 – Диаграмма Ts цикла Ренкина с перегревом пара, где:

5-4 – нагрев воды в котле до кипения;

4-6 – процесс парообразования;

6-1 – перегрев пара;

1-2 – расширение пара в турбине;

2-3 – конденсация пара;

3-5 – сжатие воды насосом.

Перегрев пара осуществляется в специальном элементе – пароперегревателе, где пар нагревается до температуры, превышающей температуру насыщения при данном давлении p_1 (участок 6-1).

Из рисунка 3 видно, что для цикла с перегревом пара процесс расширения пара в турбине 1-2, осуществляемый до того же, что и раньше, давления p_2 , заканчивается внутри двухфазной области в районе более высоких степеней сухости x , чем для цикла, изображенного на рисунке А2. Благодаря этому, как указано выше, условия работы турбины оказываются более легкими и, следовательно, повышаются внутренний относительный КПД турбины и внутренний КПД цикла.

Термический КПД идеального цикла Ренкина с перегревом пара для одноступенчатой установки определяется соотношением

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_2) - (h_5 - h_3)}{h_1 - h_5} = \frac{l_{\text{турб}} - l_{\text{нас}}}{h_1 - h_5}$$

Цикл Ренкина с перегревом пара является основным циклом теплосиловых установок, применяемых в современной теплоэнергетике.

А1.3 Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара (для реактора ВВЭР)

Рассмотрим цикл паротурбинной установки АЭС с наиболее широко применяемым реактором ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), схема которой показана на рисунке А4.

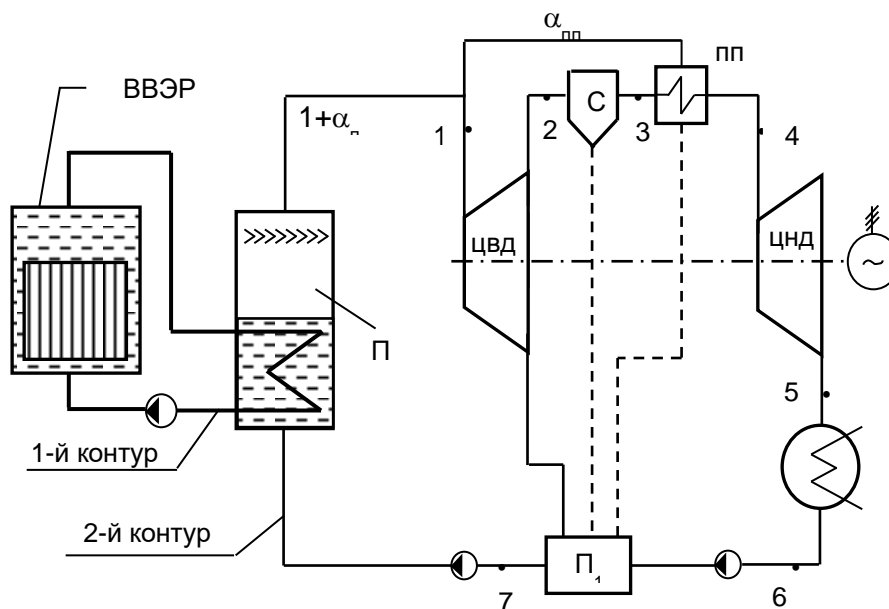


Рисунок А4 – Схема двухконтурной АЭС, работающей по циклу Ренкина с промежуточным перегревом пара, где:

- ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор;
- ПГ – парогенератор;
- С – сепаратор;
- ПП – пароперегреватель;
- ЦВД и ЦНД – цилиндры высокого и низкого давления турбины;
- П1 – смешивающий регенеративный подогреватель.

Данная АЭС является двухконтурной. В первом контуре вода, служащая одновременно и замедлителем, и теплоносителем, прокачивается циркуляционным насосом через реактор. В реакторе вода нагревается до температуры более низкой, чем температура насыщения при данном давлении. Нагретая вода поступает в парогенератор ПГ, где, отдавая теплоту воде и пару второго контура, охлаждается, после чего направляется снова в реактор.

В ходе работы двухконтурной АЭС с термодинамической точки зрения осуществляется цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара, Ts -диаграмма которого представлена на рисунке А3.

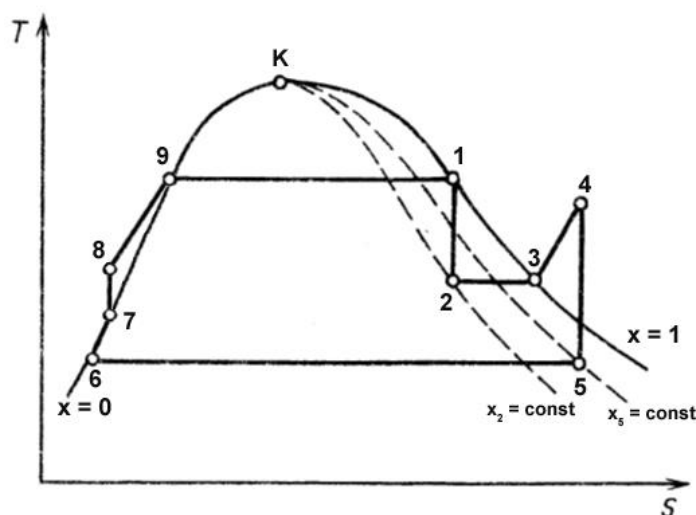


Рисунок А5 – Диаграмма Ts идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара, где:

- 8-9 – нагрев воды в парогенераторе;
- 9-1 – процесс парообразования;
- 1-2 – расширение пара в ЦВД турбины;
- 2-3 – сепарация пара;
- 3-4 – перегрев пара в пароперегревателе;
- 4-5 – расширение пара в ЦНД турбины;
- 5-6 – конденсация пара;
- 6-7 – подогрев воды в подогревателе;
- 7-8 – сжатие воды насосом.

Насыщенный пар второго контура, приготовленный в парогенераторе (участок 9-1), имеет давление p_1 и температуру T_1 (точка 1 в Ts -диаграмме на рисунке А5).

Основная часть его поступает в цилиндр высокого давления (ЦВД) турбины, где адиабатно расширяется до промежуточного давления p_2 в процессе 1-2, совершая работу.

В состоянии 2 влажный пар направляется в сепаратор С, где отделяется жидкая фаза (участок 2-3), которая передается затем в подогреватель питательной воды П1.

Сухой насыщенный пар состояния 3 из сепаратора передается в пароперегреватель ПП. Здесь он при постоянном давлении p_2 перегревается до температуры T_4 (процесс 3-4) промежуточно отобраным паром состояния 1, не прошедшим через турбину.

Отдавая теплоту, этот греющий пар конденсируется и получившийся конденсат дренируется в подогреватель питательной воды П1.

Перегретый же пар адиабатно расширяется в цилиндре низкого давления (ЦНД) турбины (участок 4-5) до давления в конденсаторе К, равного p_5 . Адиабатное расширение пара в турбине 4-5 – также процесс получения работы в цикле, наряду с участком 1-2.

Термический КПД идеального цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара для двухступенчатой установки зависит от полного расхода пара D_1 и расхода пара через ЦВД D_2 и определяется соотношением

$$\eta_t = \frac{D_2((h_1 - h_2) - x_2(h_4 - h_5))}{D_1(h_1 - h_7)}$$

где x_2 – степень сухости пара в конце его расширения в ЦВД.

А1.4 Идеальный и реальный циклы Ренкина. Учёт потерь от необратимости

Рассмотрим теперь реальный цикл Ренкина для одноступенчатой установки (цикл с потерями, обусловленными необратимостью реальных процессов). Рассмотрение потерь от необратимости в цикле Ренкина проведем с помощью метода коэффициентов полезного действия.

Цель этого рассмотрения – выяснить, в каких элементах теплосиловой паротурбинной установки имеют место основные необратимые потери, и на конкретных примерах оценить порядок величины этих потерь.

Прежде всего следует упомянуть необратимые потери при течении пара в проточной части турбины (в сопловых аппаратах и на рабочих лопатках), которые обусловлены неизбежным трением в пограничном слое и другими гидродинамическими явлениями.

Процесс адиабатного течения протекает с увеличением энтропии. В случае, когда пар на выходе из турбины является влажным, температуры в конце процесса расширения будут одинаковыми и в обратимом (T_2), и в необратимом ($T_{2д}$) процессах, поскольку процесс расширения происходит в обоих случаях до одного и того же давления p_2 , а в двухфазной области (влажный пар) изобара совпадает с изотермой. Это видно из рисунка А6, на котором изображен действительный процесс расширения пара в турбине в h_s и Ts -диаграммах.

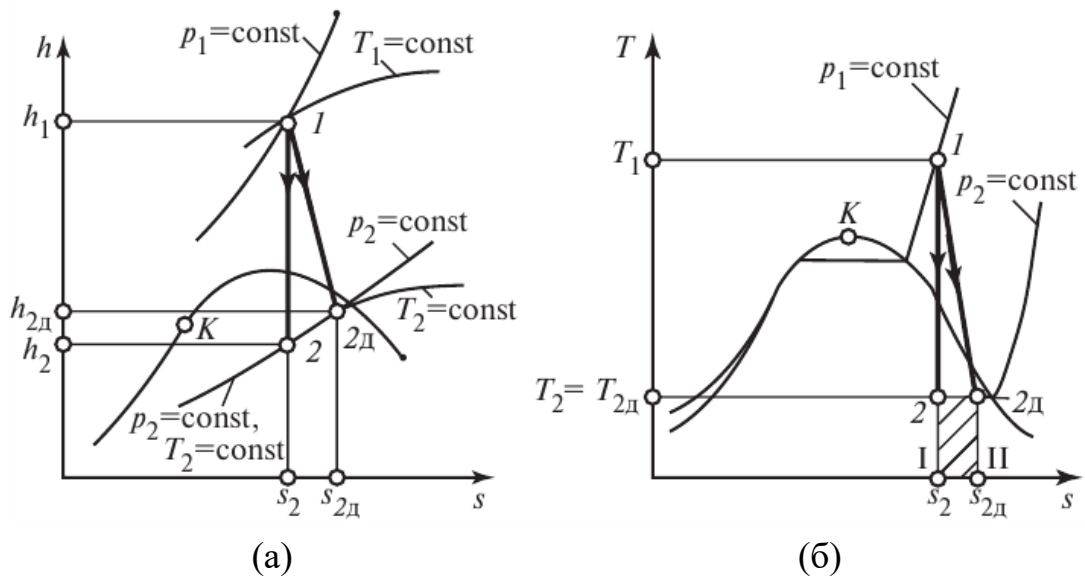


Рисунок А6 – Диаграммы hs (а) и Ts (б) процесса 1-2 реального цикла Ренкина.

Если бы процесс расширения пара в турбине был обратимым (отсутствие трения и других потерь), то в кинетическую энергию и, следовательно, в работу турбины был бы преобразован весь располагаемый перепад значений энтальпии:

$$l_T^{\text{теор}} = h_1 - h_2$$

Вследствие же необратимых потерь, работа, получаемая в турбине, в действительном процессе расширения пара, составляет меньшую величину:

$$l_T^{\text{действ}} = h_1 - h_{2d}$$

Учитывая, что всегда $h_{2d} > h_2$, то:

$$l_T^{\text{действ}} < l_T^{\text{теор}}$$

$$l_T^{\text{теор}} - l_T^{\text{действ}} = h_{2d} - h_2 = S_{I-2-2d-II-I}$$

где $S_{I-2-2d-II-I}$ – площадь фигуры I-2-2d-II-I на рисунке А6б.

В этом случае внутренний относительный КПД паровой турбины определяется следующим образом:

$$\eta_{oi} = \frac{h_1 - h_{2d}}{h_1 - h_2}$$

Отметим, что внутренний относительный КПД современных мощных паровых турбин высоких параметров составляет $\eta_{oi}^T = 0,85 \div 0,90$.

Аналогичным образом рассчитывается КПД насоса. Внутренний относительный КПД насоса составляет $\eta_{oi}^{нас} = 0,85 \div 0,90$, т.е. примерно равен η_{oi}^T .

Учитывая внутренние относительные КПД турбины и насоса, действительный КПД цикла Ренкина с перегревом пара для одноступенчатой установки имеет вид:

$$\eta_i = \frac{(h_1 - h_{2д}) - (h_{5д} - h_3)}{h_1 - h_{5д}} = \frac{l_{турб}^{действ} - l_{нас}^{действ}}{h_1 - h_{5д}}$$

А2 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Моделирование циклов производится в приложении «Rankine_NPP», реализованном в программном пакете MATLAB. Для корректной работы программы на компьютере должен быть установлен пакет MATLAB версии R2017b и старше.

Главное окно приложения разделено на две вкладки – «Перегрев пара» и «Промежуточный перегрев пара».

Интерфейс вкладки «Перегрев пара» представлен на рисунке А7.

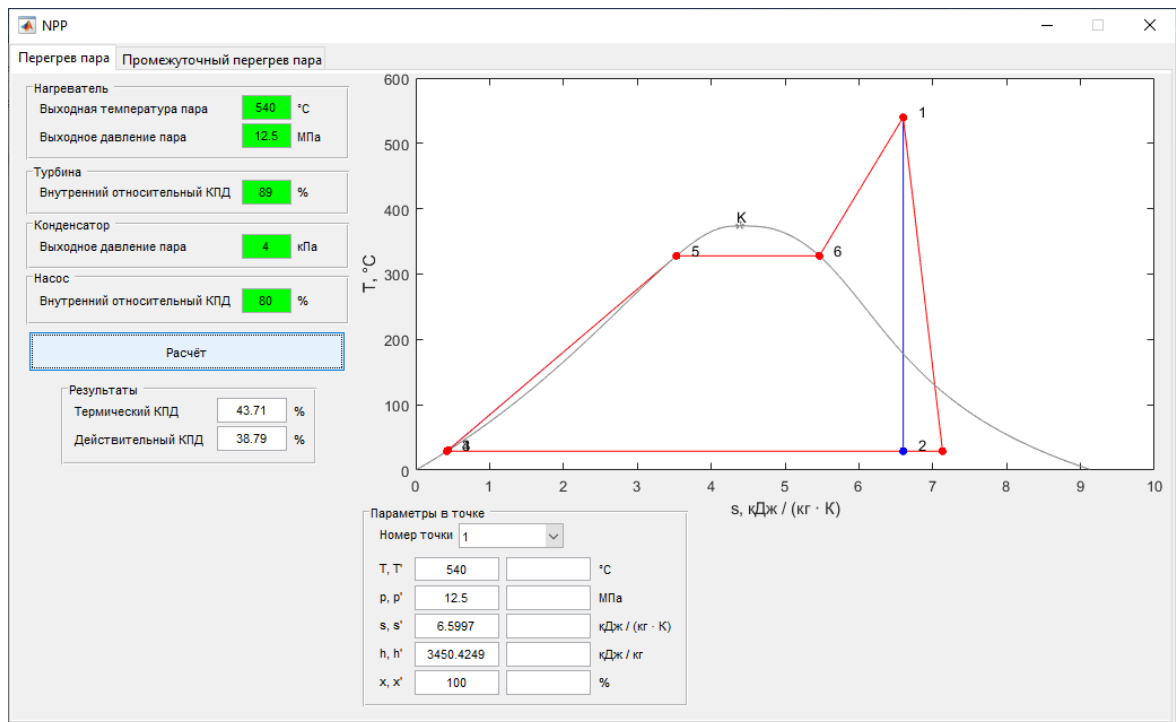


Рисунок А7 – Интерфейс вкладки «Перегрев пара».

Для построения циклов Ренкина с перегревом пара необходимо ввести начальные данные (значения температуры и давления пара на выходе из нагревателя (парогенератора), внутренний относительный КПД турбины, давление пара на выходе из конденсатора, внутренний относительный КПД насоса) и нажать кнопку «Расчёт».

Для просмотра параметров в точках цикла необходимо использовать панель «Параметры в точке», на которой из выпадающего списка можно выбрать номер исследуемой точки. В случае совпадения параметров в идеальном и реальном циклах на панели отобразятся параметры только лишь в первом столбце, если же параметры не совпадают – в двух столбцах (первый – идеального цикла, второй – реального).

Результатом работы приложения являются:

- значения термического и действительного КПД циклов Ренкина с перегревом пара;
- значения термодинамических параметров пара в различных точках идеального и реального циклов Ренкина с перегревом пара;
- Ts -диаграммы циклов – идеального (синий) и реального (красный).

Интерфейс вкладки «Промежуточный перегрев пара» представлен на рисунке А8.

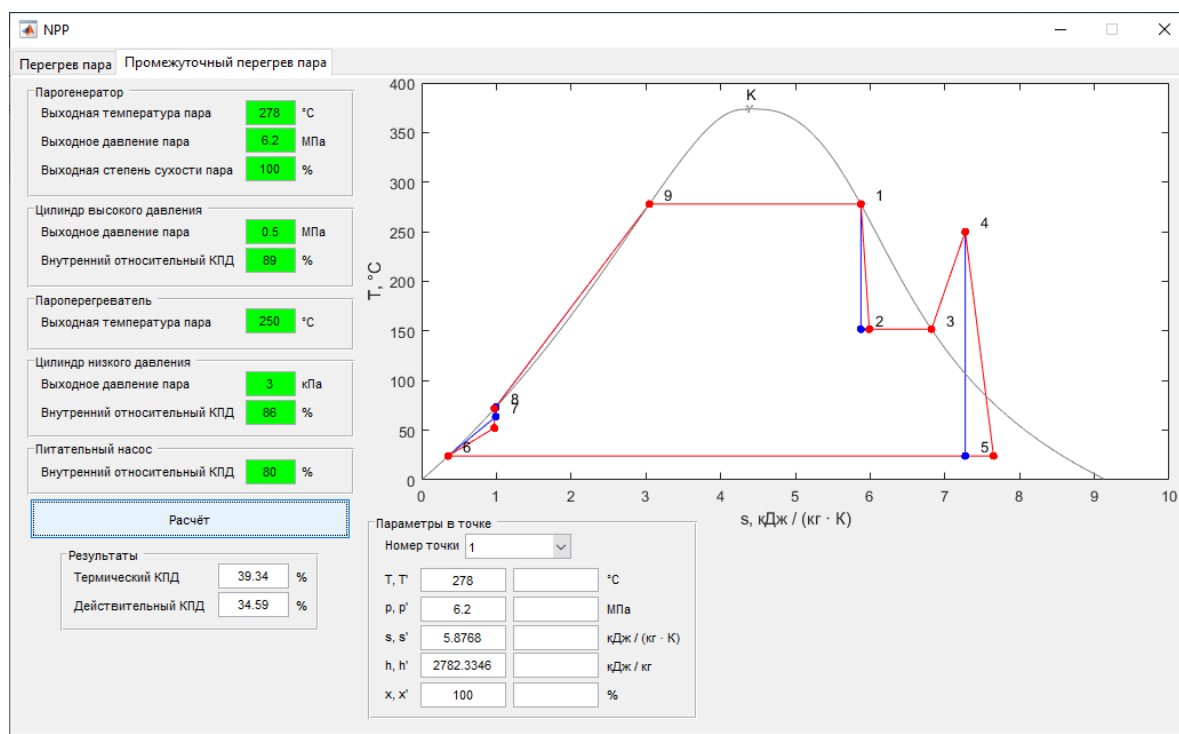


Рисунок А8 – Интерфейс вкладки «Промежуточный перегрев пара».

Процедура построения циклов, а также просмотра параметров в точках цикла аналогична соответствующей процедуре на вкладке «Перегрев пара»: необходимо ввести начальные данные и нажать кнопку «Расчёт».

Результатом работы приложения являются:

- значения термического и действительного КПД циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара;
- значения термодинамических параметров пара в различных точках идеального и реального циклов Ренкина с промежуточным перегревом пара;
- Ts -диаграммы циклов – идеального (синий) и реального (красный).

А3 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

А3.1 Цикл Ренкина с перегревом пара

1. Ознакомьтесь с интерфейсом вкладки «Перегрев пара» приложения.
2. Постройте цикл Ренкина с перегревом пара, используя предложенные параметры. Определите термический и действительный КПД установки.
3. С помощью приложения определите значения термодинамических характеристик в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина.
4. Проанализируйте результаты, полученные в ходе выполнения заданий 2, 3.
5. Постройте ряд циклов Ренкина с перегревом пара, варьируя параметры энергетической установки.
6. Проанализируйте влияние параметров каждого из элементов тепловой схемы энергетической установки на ее термический и действительный КПД, а также на термодинамические характеристики в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина.
7. Используя параметры реальных ТЭС, рассчитайте характеристики цикла Ренкина для данных энергетических установок.
8. Проанализируйте термический и действительный КПД их циклов, а также термодинамические характеристики в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина, и сравните с предыдущими значениями.

А3.2 Цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара

1. Ознакомьтесь с интерфейсом вкладки «Промежуточный перегрев пара» приложения.

2. Постройте цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара, используя предложенные параметры. Определите термический и действительный КПД установки.

3. С помощью приложения определите значения термодинамических характеристик в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина.

4. Проанализируйте результаты, полученные в ходе выполнения заданий 2, 3.

5. Постройте ряд циклов Ренкина с перегревом пара, варьируя параметры энергетической установки.

6. Проанализируйте влияние параметров каждого из элементов тепловой схемы энергетической установки на ее термический и действительный КПД, а также на термодинамические характеристики в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина.

7. Используя параметры, полученные от преподавателя, постройте цикл, используемый на реальной АЭС, рассчитайте характеристики цикла Ренкина для ядерной энергетической установки.

8. Проанализировать термический и действительный КПД данного циклов, а также термодинамические характеристики в каждой точке идеального и реального циклов Ренкина, и сравните с предыдущими значениями.

А4 КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Изобразите цикл Ренкина.

2. Поставьте в соответствие каждому из участков цикла Ренкина элемент тепловой схемы энергетической установки, работающей по данному циклу.

3. Изобразите цикл Ренкина с перегревом пара. В чем его преимущества по сравнению с циклом без перегрева пара?

4. Поставьте в соответствие каждому из участков цикла Ренкина с перегревом пара элемент тепловой схемы энергетической установки, работающей по данному циклу.

5. Изобразите цикл Ренкина с промежуточным перегревом пара. В каких типах энергетических установок он применяется?

6. Поставьте в соответствие каждому из участков цикла Ренкина с промежуточным перегревом пара элемент тепловой схемы энергетической установки, работающей по данному циклу.

7. Как термический КПД цикла Ренкина

а) без перегрева пара,

б) с перегревом пара,

в) с промежуточным перегревом пара

определяется через термодинамические характеристики энергетической установки?

8. Сопоставьте данные характеристики с конкретными точками цикла Ренкина

- а) без перегрева пара,
- б) с перегревом пара,
- в) с промежуточным перегревом пара.

9. Какие параметры энергетической установки влияют на термический КПД цикла Ренкина?

10. Каким образом происходит учет потерь от необратимости в цикле Ренкина с точки зрения его термического КПД?

11. Как отличаются идеальный и реальный циклы Ренкина с перегревом пара? С промежуточным перегревом пара?

12. Изобразите данную пару циклов.

13. Опишите влияние степени сухости пара на режимы работы энергетических установок.

14. Сделайте выводы по итогам выполнения лабораторной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

2. Александров, А.А. Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / А.А. Александров. – М.: Издательство МЭИ, 2004.

3. Ганжа, В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов: теория и практика энергосбережения / В.Л. Ганжа. – Минск: Белорусская наука, 2007.