

Санкт-Петербургский государственный университет



ГУБАНОВ Сергей Андреевич

Выпускная квалификационная работа

Оптимизация термодинамических параметров судовых паротурбинных установок

Уровень образования: магистратура

Направление 03.04.01 «Прикладные математика и физика»

Основная образовательная программа ВМ.5521.2020 «Математические и информационные технологии»

Научный руководитель: д.т.н.,
профессор Кудинович И.В.

Рецензент: гл. науч. сотр.
Крыловского науч. центра,
д.т.н., профессор Рубанов С.М.

Санкт-Петербург
2022

Содержание	
Введение.....	3
1. Судовые паротурбинные установки	5
1.1. Схема и цикл простейшей паротурбинной установки	5
1.2. Тепловая схема паротурбинной установки	7
1.3. Термодинамические параметры цикла ЯЭУ	11
1.4. Параметры пара.....	13
1.5. Принципиальные тепловые схемы ПТУ	15
2. Физико-математическая модель ПТУ	20
3. Методы оптимизации	23
3.1. Метод покоординатного спуска	23
3.2. Метод золотого сечения	26
4. Оптимизация термодинамических параметров ПТУ	29
4.1. Метод покоординатного спуска для расчета оптимальных значений начального давления и температуры питательной воды	29
4.2. Метод покоординатного спуска для расчета оптимальных значений давлений регенеративного отбора	35
Заключение	41
Список литературы	42

Введение

Арктика обладает значительными природными ресурсами, включая углеводороды, руды различных металлов и алмазы, добыча которых приносит большой вклад в валовой внутренний продукт (ВВП) государства. В Арктической зоне Российской Федерации сосредоточена четверть запасов нефти и более 70% газа, стоимость которых составляет более 20 трлн. долларов. В пределах материковой части Арктики выявлены уникальные запасы и прогнозные ресурсы медно-никелевых руд, олова, платиноидов, агрохимических руд, редких металлов и редкоземельных элементов, крупные запасы золота, алмазов, вольфрама, ртути, чёрных металлов, оптического сырья и поделочных камней, 10% запаса никеля, 19% металлов платиновой группы, 10% титана, более 3% цинка, кобальта и серебра.[17]

Планы развития компаний-недропользователей в Арктике, связанные с увеличением объёмов добываемого сырья, а также с необходимостью обустройства месторождений, предприятий по их обслуживанию, требуют улучшения транспортной доступности и расширение сроков навигации для круглогодичной работы.[17] В связи с выходом указа президента РФ «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» от 7 мая 2018 г. № 204, в котором пунктом «а» п. 15 поставлена задача по развитию СМП и увеличению грузопотока по нему до 80 млн.т.[14]

Для успешного развития грузоперевозок и обеспечения безопасного судоходства в акватории СМП является развитие атомного ледокольного флота. На сегодняшний день уже построено 2 новых универсальных атомных ледокола проекта 22220 (ЛК-60Я) «Арктика» и «Сибирь» с мощностью на валах 60 МВт. Ведётся строительство ещё трёх ледоколов данного проекта на АО «Балтийский завод» с сроком ввода в эксплуатацию: УАЛ «Урал» – 2022 г.; УАЛ «Якутия» – 2024 г.; УАЛ «Чукотка» – 2026 г.

Все эти ледоколы нуждаются в увеличении эффективности работы, а значит в оптимизации установленных на них силовых установок.

Целью данной работы является оптимизация судовой энергетической установки для атомных ледоколов.

Для осуществления поставленной задачи необходимо:

- разработать математическую модель, в основе которой лежит баланс потоков масс и энергий в цикле паротурбинной установки;
- выбрать методы оптимизации;
- реализовать программу для выбранных методов оптимизации.

1. Судовые паротурбинные установки

1.1. Схема и цикл простейшей паротурбинной установки

Паротурбинные установки (ПТУ) работают по закрытому циклу. Их рабочим телом является водяной пар и его конденсат. ПТУ открытого цикла в судовой энергетике не используются из-за высокого расхода питательной воды и низкого коэффициента полезного действия (КПД).

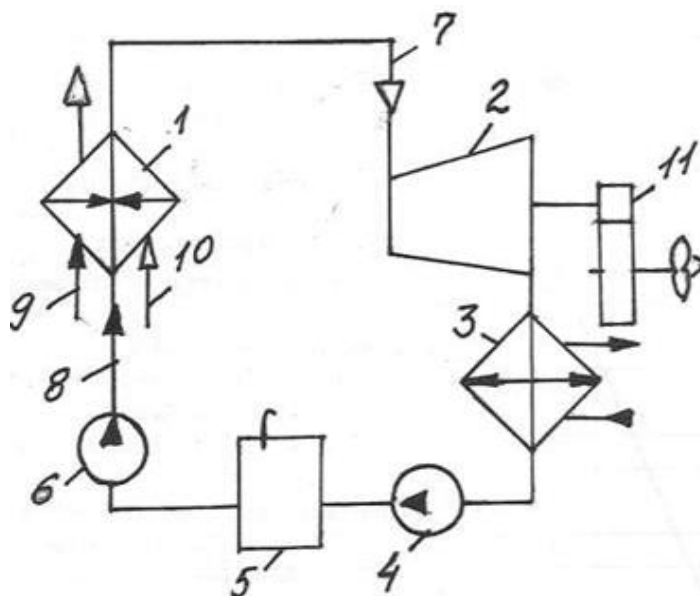


Рисунок 1.1. Принципиальная схема простейшей ПТУ

В состав простейшей ПТУ (рис. 1.1) входят паровой котел 1, паровая турбина 2, конденсатор 3, конденсаторный насос 4, теплый ящик 5, питательный насос 6. Судовые ПТУ работают на перегретом паре, поэтому к паровой турбине подводится перегретый пар 7. Для работы парового котла к нему подводятся питательная вода 8, топливо 9, воздух 10, отводится перегретый пар 7. В паровой турбине внутренняя энергия пара преобразуется в механическую энергию вращения ротора, которая через редуктор 11 передается судовому движителю.

За идеальный цикл ПТУ принимают цикл Ренкина (рис. 1.2). В изоэнтропийном процессе расширения пара в турбине 1-2 давление понижается от p_1 до p_2 . Отработавший в турбине пар, конденсируется в

конденсаторе в изобарическом процессе 2-3 (для влажного пара изобарический процесс в то же время является изотермическим). Для подачи воды в котел используется питательный насос, который повышает давление воды от p_2 до p_1 - процесс 3-3' (для схемы, приведенной на рис. 1.1 указанное повышение давления осуществляется в питательном и конденсатном насосах). В паровом котле питательная вода в изобарическом процессе при давлении p_1 превращается в перегретый пар в результате подвода удельной теплоты q_1 . Сначала вода нагревается до состояния кипения - процесс 3'-4, затем идет процесс кипения и парообразования 4-5, после чего пар перегревается в процессе 5-1.[14]

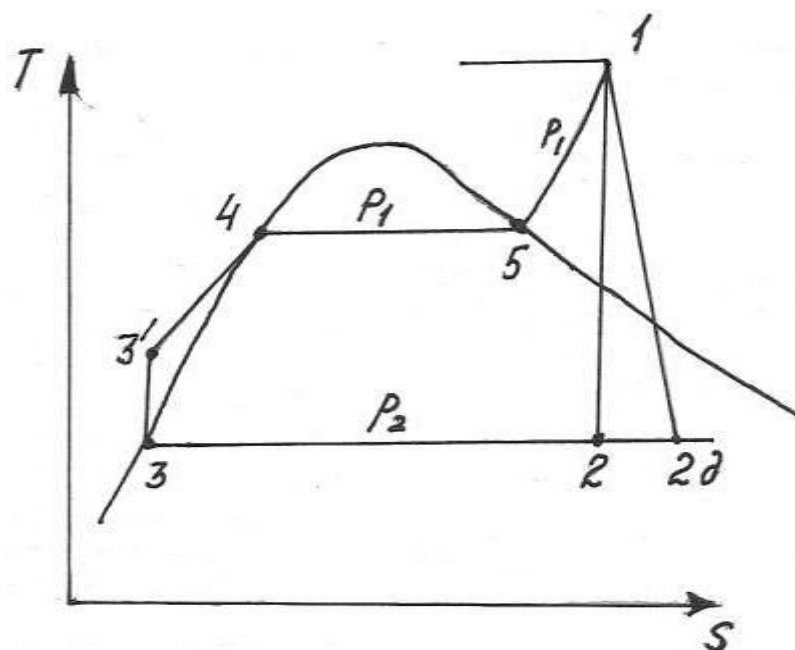


Рисунок 1.2. Цикл простейшей ПТУ

Для получения 1 кг пара в котле требуется теплота

$$q_1 = i_1 - i_{3'}, \quad (1.1)$$

где i_1 и $i_{3'}$ – энтальпия пара и воды в состояниях 1 и 3' цикла.

В процессе конденсации пара теплота отводится. Для конденсации 1 кг пара требуется отвести теплоту в количестве:

$$q_2 = i_2 - i_3, \quad (1.2)$$

где i_2 и i_3 – энтальпия пара и воды в состояниях 2 и 3 цикла.

Экономическая эффективность цикла оценивается термическим КПД

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_3} = 1 - \frac{i_2 - i_3}{i_1 - i_3} \quad (1.3)$$

В выражении (1.3) принято. Это связано с тем, что удельная работа питательного насоса ничтожно мала по сравнению с подведенной в цикл теплотой или его работой.[14]

Теоретическая работа цикла, совершаемая 1 кг рабочего тела, находится по выражению

$$l = q_1 - q_2 = i_1 - i_2, \quad (1.4)$$

Тогда выражение (1.3) можно представить в виде

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} \quad (1.5)$$

Значение термического КПД цикла зависит от начальных параметров пара (p_1 и T_1) и конечных параметров (p_2).

С учетом допустимой влажности пара в последних ступенях паровой турбины ($x \geq 0,88$) для каждого значения начальной температуры T_1 существует оптимальное значение начального давления p_1 . Такие параметры (p_1 и T_1) называются сопряженными. Для $t_1 = 510 \dots 520^\circ\text{C}$ сопряженное давление $p_1 = 6 \dots 8$ МПа, для $t_1 = 450 \dots 480^\circ\text{C}$ соответственно $p_1 = 4 \dots 5$ МПа.

1.2. Тепловая схема паротурбинной установки

В состав паротурбинной установки кроме паротурбинного двигателя входят многочисленные механизмы, двигатели, теплообменники, аппараты и устройства, которые образуют единый энергетический комплекс.

Тепловая схема есть условное изображение частей реальной установки и взаимосвязей между ними, необходимых для осуществления рабочего процесса энергетической установки и для снабжения энергией общесудовых потребителей. Различают принципиальные и развернутые тепловые схемы.

Принципиальная тепловая схема указывает способ последовательного соединения частей установки. Одноименные или функционально однородные механизмы и аппараты условно заменяют одним механизмом или аппаратом, резервное оборудование не показывают. Из арматуры указывают только необходимую для уяснения основных связей между частями установки. Принципиальная тепловая схема должна фиксировать следующие основные особенности установки и взаимосвязи ее частей:

- тип термодинамического цикла (регенеративный или не регенеративный, с промежуточным перегревом пара или без него и т.д.);
- тип и способ включения в схему аппаратов, осуществляющих регенерацию;
- способ питания паром главных и вспомогательных двигателей, а также обеспечение энергией общесудовых потребителей;
- способ использования отработавшего пара вспомогательных механизмов и его избытка, а также теплоты основных потоков горячих конденсатов;
- принятый способ восполнения убыли питательной воды.

Развернутая тепловая схема отличается от принципиальной тем, что кроме указанных особенностей установки, она фиксирует число одноименных механизмов и аппаратов и их включение в схему, т. е. не только последовательное соединение частей установки, но и соединение параллельно работающих одинаковых механизмов и аппаратов. Поэтому развернутая схема может фиксировать и резервное оборудование.

Для повышения экономичности ПТУ используют подогрев питательной воды паром, отбираемым от главных турбин или паром, отработавшим во вспомогательных турбинах. Такие ПТУ называют регенеративными.[11]

Все судовые ПТУ с регенерацией можно разделить на установки или схемы 1-го, 2-го и 3-го рода.[3]

В тепловых схемах 1-го рода подогрев питательной воды производится только паром из отборов главной турбины. На рисунке 1.3 представлена упрощенная принципиальная тепловая схема регенеративной ПТУ 1-го рода.

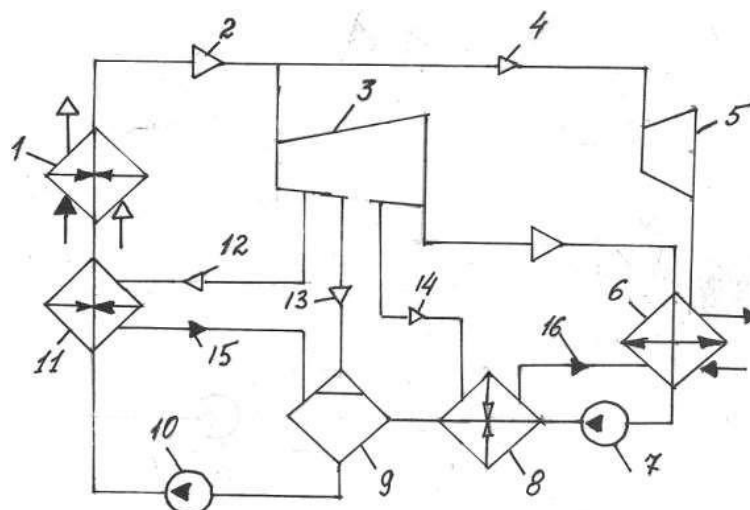


Рисунок 1.3 – Принципиальная тепловая схема регенеративной ПТУ 1-го рода, где 1 – паровой котел; 2 – отвод перегретого пара от котла; 3 – главная турбина; 4 – подвод пара к вспомогательной турбине; 5 – вспомогательная турбина конденсационного типа; 6 – главный конденсатор; 7 – конденсатный насос; 8 – подогреватель питательной воды низкого давления; 9 – деаэрактор-подогреватель питательной воды (смесительного типа); 10 – питательный насос; 11 – подогреватель питательной воды высокого давления; 12, 13, 14 – отборы греющего пара от главной турбины для подогрева питательной воды; 15, 16 – отвод конденсата греющего пара от подогревателей питательной воды.

Число отборов пара и ступеней подогрева питательной воды может быть от одного до пяти. Вспомогательные механизмы обычно приводятся во вращение конденсационными турбинами, так как в схемах 1-го рода это всегда экономичнее. Схемы 1-го рода применяются в установках транспортных судов, у которых более 90% ходового времени – полный ход.[4]

В установках, длительно работающих на средних и малых ходах судна, применение схем 1-го рода невозможно или крайне затруднительно. Это связано с большими изменениями параметров пара в проточной части главной турбины. На таких судах используют схемы 2-го рода, в которых регенеративный подогрев питательной воды осуществляется отработавшим паром вспомогательных турбин. На рисунке 1.4 представлена упрощенная принципиальная тепловая схема регенеративной ПТУ 2-го рода.

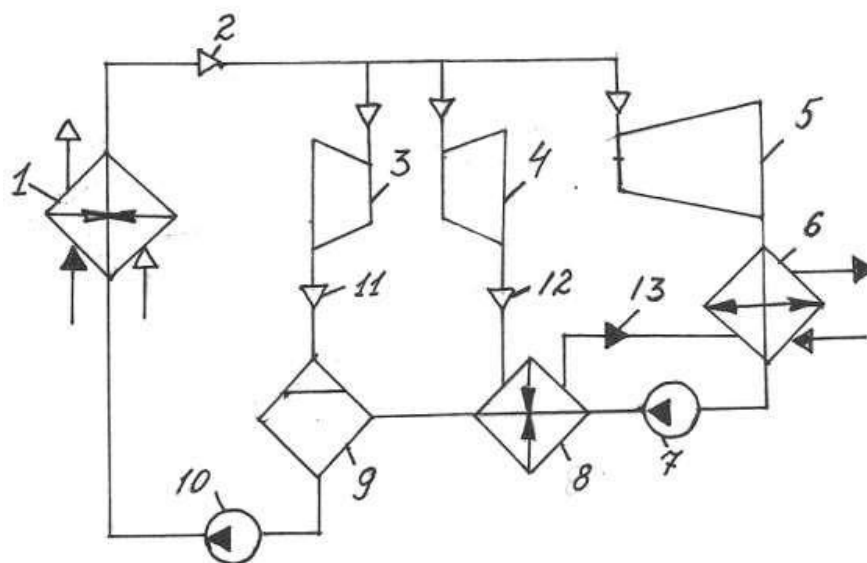


Рисунок 1.4 – Принципиальная тепловая схема регенеративной ПТУ 2-го рода, где 1 – паровой котел; 2 – отвод перегретого пара от котла; 3 – вспомогательная турбина противодавленческого типа; 4 – вспомогательная турбина конденсационного типа; 5 – главная турбина; 6 – главный конденсатор; 7 – конденсатный насос; 8 – подогреватель питательной воды низкого давления; 9 – деаэратор – подогреватель питательной воды; 10 – питательный насос; 11, 12 – подвод отработавшего пара во вспомогательных турбинах для подогрева питательной воды; 13 – отвод конденсата греющего пара.

В схемах смешанного типа (3-го рода) пар для регенеративного подогрева питательной воды берут от главных и вспомогательных турбин одновременно. На рисунке 1.5 показана упрощенная тепловая схема регенеративной ПТУ 3-го рода.

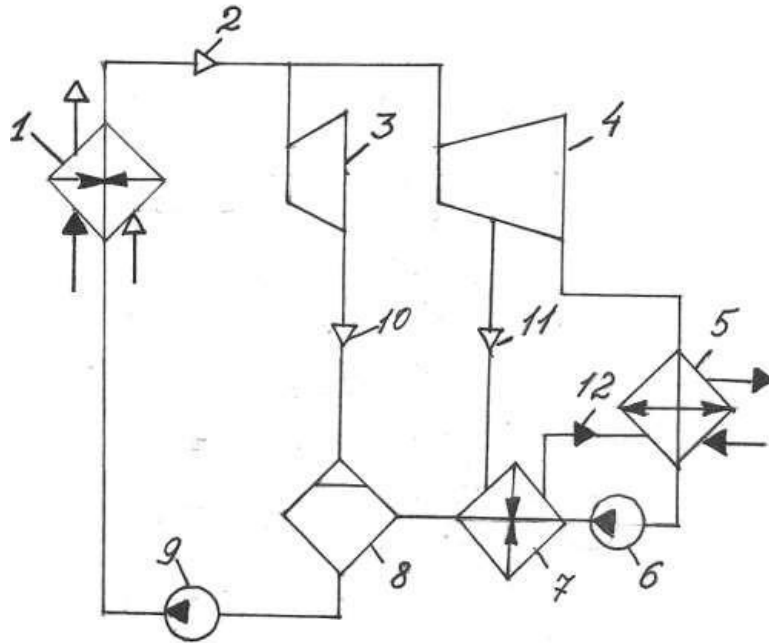


Рисунок 1.5. Принципиальная тепловая схема регенеративной ПТУ 3-го рода, где 1 – паровой котел; 2 – отвод перегретого пара от котла; 3 – вспомогательная турбина противодавленческого типа; 4 – главная турбина; 5 – главный конденсатор; 6 – конденсатный насос; 7 – подогреватель питательной воды низкого давления; 8 – деаэратор-подогреватель питательной воды; 9 – питательный насос; 10 – отвод отработавшего во вспомогательной турбине пара для подогрева питательной воды; 11 – подвод пара, отбираемого от главной турбины для подогрева питательной воды; 12 – отвод конденсата греющего пара.

1.3. Термодинамические параметры цикла ЯЭУ

Важнейшими параметрами ПТУ, от которых зависит термический КПД цикла, являются: давление и температура свежего пара, давление в конденсаторе, допустимая влажность пара на выходе из турбины, внутренний КПД турбины.

Параметры ПТУ эксплуатирующихся атомных судов приведены в табл.1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики ПТУ атомных судов [11,13]

Параметр	пр.10521 (а/л 50 лет Победы)	пр.10580 (а/л «Таймыр», «Вайгач»	пр. 10081 (ат.лих. «Севморпуть»	пр.22220 (а/л «Арктика»	пр.20870 (ПЭБ «Академик Ломоносов»
Мощность, МВт	27,6	18,4	29,4	36	35* 38,5**
Давление пара за ПГ, МПа	3,3	3,3	4	3,8	3,6
Температура пара за ПГ, °С	305	300	290	295	390
Давление пара перед ПТУ, МПа	2,94	2,8	3,6	3,43	3,43
Температура пара перед ПТУ, °С	295	290	285	285	284
Давление в ГК, кПа	7,0	4,0	7,5	5,0	5,0
Температура питательной воды перед ПГ, °С	104	104	165	105	170
Марка ПТУ (ГТГ, ГТЗА)	ГТГ 642	ГТГ 642Т	ГТЗА 684	ПТУ-72	ПТУ ТК-35/38-3.4с
Тип турбины	Однокорпусная		Двухкорпусная (ТВД+ТНД) с межкорпусной сепарацией	Двухкорпусная (ТВД+ТНД) с межкорпусной сепарацией	Однокорпусная с внутренней сепарацией

*спецификационный режим, с учетом отбора на теплофикацию

**максимальный электрофикационный режим (без отбора на теплофикацию)

1.4. Параметры пара

В двухконтурной водо-водяной реакторной установке температура генерируемого пара зависит от температуры теплоносителя первого контура на выходе из активной зоны. Для обеспечения достаточной стойкости оболочек ТВЭЛов при отсутствии равновесного кипения теплоносителя первого контура в наиболее напряжённых тепловыделяющих каналах (при приемлемом давлении) температура на поверхности ТВЭЛов не должна превышать 340 °С. Учитывая интенсивность теплопередачи к однофазной жидкости, температура теплоносителя на выходе из активной зоны, будет ограничена величиной 320 °С. Чем больше площадь трубной системы, тем ближе температура пара на выходе из ПГ к температуре теплоносителя первого контура. Оптимальные габариты ПГ получаются при разности этих температур не менее 20 °С. Таким образом, верхний предел температуры перегретого пара в современных судовых РУ составляет 300 °С. В реакторах типа РИТМ-200 на номинальном уровне мощности температура пара на выходе из ПГ равна 295 °С при давлении 3,8 МПа. Давление перед соплами турбины примерно на 0,5 МПа ниже давления пара перед ПТУ [13].

На рисунке 1.6 представлена h-s диаграмма рабочего процесса слабо перегретого пара в турбине (температура пара за ПГ и перед соплами турбины 295 °С и 285 °С соответственно).

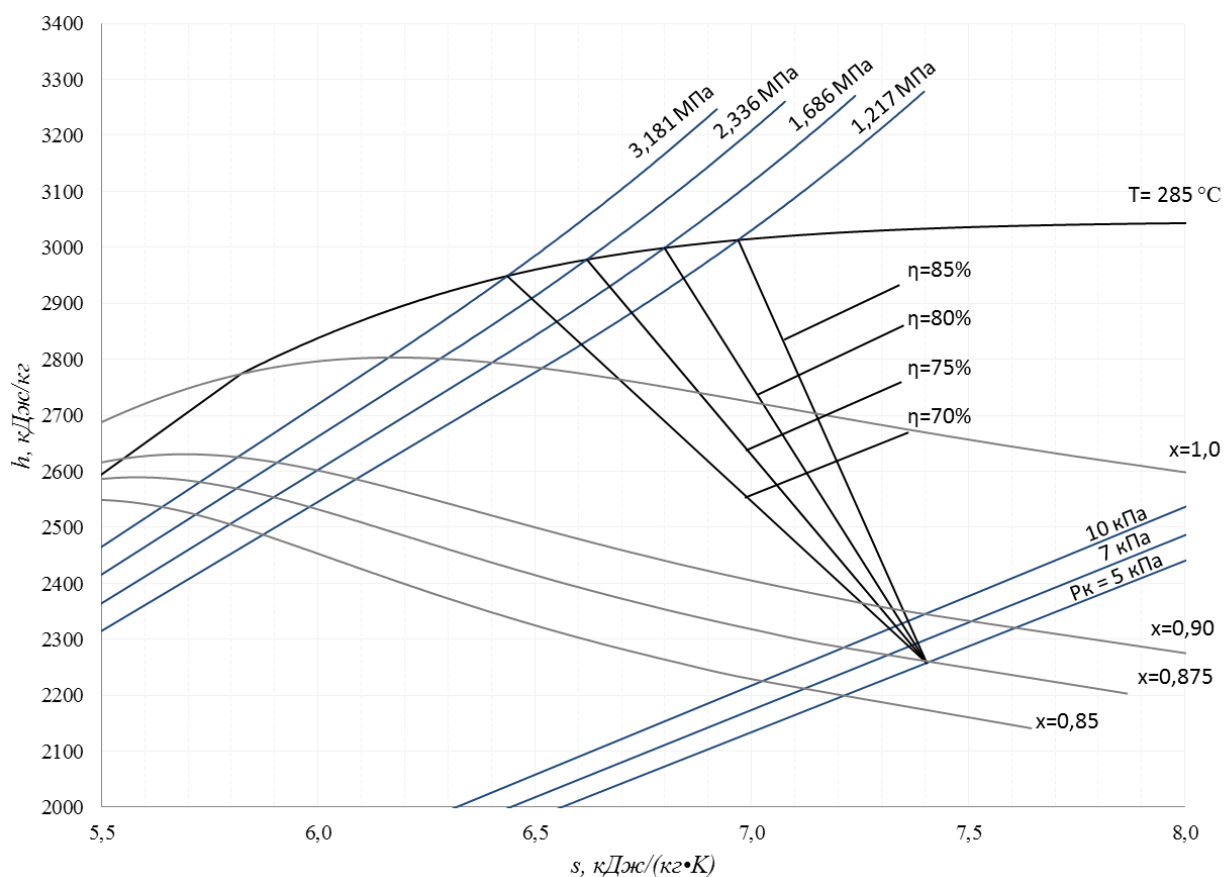


Рисунок 1.6. h-s диаграмма теплового процесса в турбине (p_0 , T_0 – давление и температура перед турбиной, p_k – давление за турбиной, η – КПД турбины)

Повышение начального давления пара при сохранении его начальной температуры и давления в конденсаторе приводит к некоторому росту термического КПД цикла (см. рисунок 1.7). Фактором, ограничивающим величину давления свежего пара, является влажность пара на последних ступенях турбины. Помимо снижения КПД турбины повышенная влажность вызывает эрозию лопаток, диафрагм, иногда корпуса, поэтому для судовых турбин принято устанавливать предельно допустимую влажность пара на уровне 10-12 %. Некоторое увеличение допустимой влажности достигается технологическими усовершенствованиями лопаток – использованием специальных наплавов, упрочнение кромок и т.п.

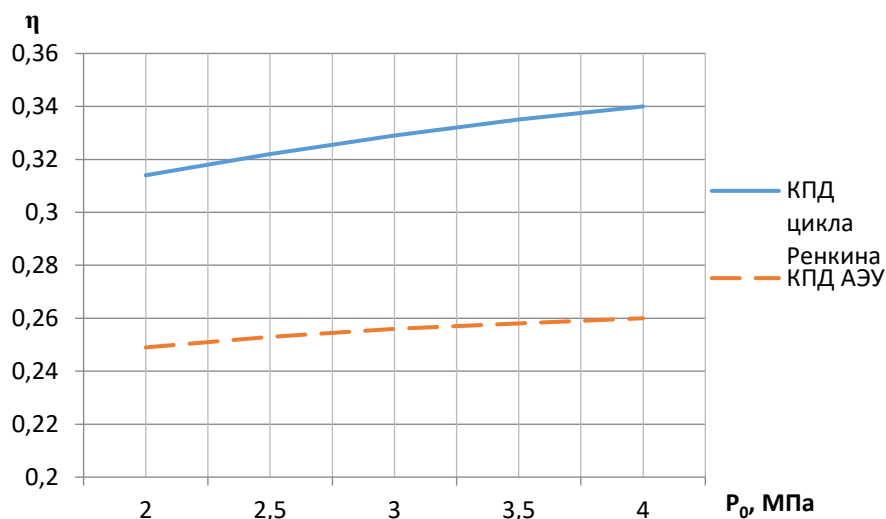


Рисунок 1.7. Зависимость КПД цикла от давления свежего пара (температура пара 300 °С, давлении в конденсаторе 0,01 МПа) для цикла Ренкина и идеализированной ЯЭУ простого цикла (нерегенеративной установки, в которой отсутствует затраты на вспомогательные механизмы и непроизводительные потери энергии)

Исходя из вышеизложенного, следует признать обоснованными термодинамические параметры пара для ПТУ ПЭБ указанные в таблице 1.1.

1.5. Принципиальные тепловые схемы ПТУ

Принципиальным фактором повышения тепловой эффективности ПТУ является применение регенеративного подогрева питательной воды. В связи с задачей повышения тепловой эффективности энергетической установки для ПЭБ рассматриваются варианты схем ПТУ с регенерацией тепла.

Оптимальная по термодинамическим соображениям температура подогрева питательной воды определяется зависимостью [1]:

$$T_{\text{п.в.}}^{\text{опт.}} = \sqrt[n+1]{T_s^n \cdot T_2},$$

где T_s – температура насыщения пара в парогенераторе, К;

n – число ступеней регенеративного подогрева;

T_2 – температура конденсата, К.

С учётом возможного варьирования температуры конденсата в ГК: 40...60 °С и начального давления свежего пара в пределах 3,0...4,0 МПа оптимальная температура подогрева питательной воды указана в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Оптимальная температура подогрева питательной воды.

число ступеней подогрева	температура подогрева, °С
1	125-130
2	150-160
3	170-180

При одной ступени подогрева питательной воды рекомендуется использовать подогреватель смешительного типа – деаэратор, при этом оптимальная температура подогрева – 125÷130 °С, т.е. давление в деаэраторе должно быть 0,25-0,28 МПа, если давление в деаэраторе 0,13 МПа, то температура питательной воды будет 105-106 °С.

Отбор пара низкого давления из турбины на подогрев конденсата эффективен благодаря возможности срабатывания в турбине значительной части теплоперепада отбираемого пара. Предварительный подогрев конденсата в ПНД до подачи его в деаэратор может осуществляться паром, отбираемым из турбины при давлении 0,9...1 кгс/см². Целесообразность применения ПНД в регенеративной схеме должна рассматриваться с учётом разности температур воды в главном конденсаторе и деаэраторе, а также конструктивной возможностью обеспечения гидростатического подпора от подогревателя до места слива конденсата греющего пара в конденсатно-питательную систему. Средне допустимым значением подогрева воды в деаэраторе можно считать 55...65 °С. При температуре конденсата в главном конденсаторе $t_k = 40-60$ °С и температуре воды в деаэраторе – 106 °С (давление 0,13 МПа) разность температур составляет 46-66 °С, в этом случае можно не устанавливать ПНД. В случае, если давление в деаэраторе 0,25 МПа и температура воды в деаэраторе соответственно около 125 °С, а

температура конденсата $t_k = 40$ °С разность температур составит 85 °С и применение ПНД целесообразно.

При работе ЯЭУ на номинальной мощности регенеративная схема с двумя ступенями подогрева (ПНД и деаэратор) (схема 4 рисунок 1.8) обеспечивает относительное увеличение КПД на 25 % по сравнению с нерегенеративной схемой (схема 1 рисунок 1.8) и на 3 % по сравнению с чисто деаэрационной схемой (одна ступень подогрева) (схема 2 рисунок 1.8).

Введение ПВД (третья ступень регенерации после атмосферного деаэратора) (схемы 5,6,7 рисунок 1.8) приводит к повышению температуры питательной воды со 105°С до 170°С и обеспечивает относительное увеличение КПД на 2 % по сравнению со схемами с двумя регенеративными ступенями подогрева. Давление в камерах отборов турбины (а соответственно и в магистралях отборов при нерегулируемых отборах) примерно пропорционально нагрузке, поэтому при выборе давления в отборе должен быть задан диапазон нагрузок, в котором предусматривается использование отборов для подогрева питательной воды. Отбор высокого давления для подогрева питательной воды должен иметь давление около 1 МПа, если нижний предел диапазона изменения мощности турбины, при котором используется отбор, определён $0,6...0,7 N_{ном}$, то давление в отборе на номинальном режиме должно быть около 1,65...1,45 МПа.

Следует отметить, что увеличение количества оборудования и усложнение конденсатно-питательной системы при развитых регенеративных схемах приводит к некоторому снижению надежности ЯЭУ, однако для ПЭБ, в которых ЯЭУ работает преимущественно на постоянном уровне мощности, целесообразно применение трех ступеней регенерации.

Анализ различных принципиальных схем ПТУ показал, что наиболее оптимальной для ПЭБ является схема с полностью электрифицированными вспомогательными механизмами и с подогревом питательной воды паром, отбираемым от ГТГ. Замена турбопривода мощных вспомогательных

механизмов (питательные насосы, циркуляционные насосы заборной воды) на электропривод с частотным регулированием не только облегчает эксплуатацию, но и несколько повышает тепловую эффективность установки, при этом регенеративные подогревы осуществляются за счет промежуточных отборов пара от главного турбоагрегата (схемы 3,6,7 рисунок 1.8). На ПЭБ могут применяться схемы с регенеративным подогревом в ПНД, деаэраторе и подогревателях высокого давления (ПВД) за счет трех отборов от главного турбоагрегата (схемы 6,7 рисунок 1.8).

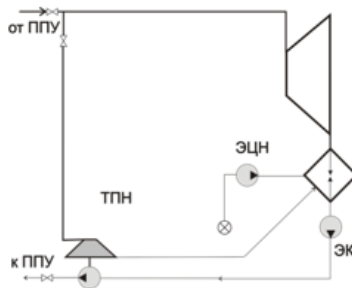


Схема 1 - Регенеративный подогрев отсутствует

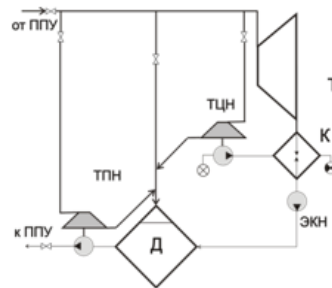


Схема 2 - Регенеративный подогрев питательной воды в деаэраторе отработавшим паром вспомогательных турбомеханизмов (ледоколы пр.10521, 10580)

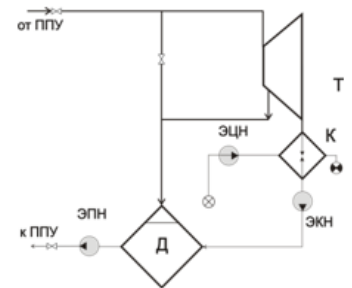


Схема 3 - Регенеративный подогрев питательной воды в деаэраторе паром с отбора главной турбины, вспомогательные механизмы с электроприводами (УАЛ пр. 22220)

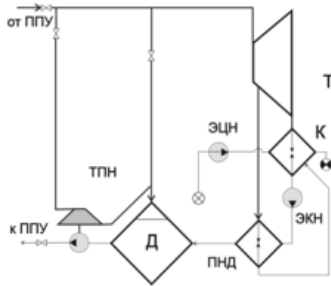


Схема 4 - Регенеративный подогрев питательной воды в ПНД и деаэраторе

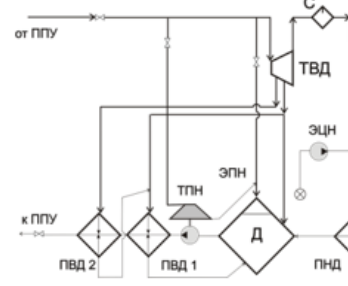


Схема 5 - Регенеративный подогрев питательной воды в ПНД, деаэраторе и двух ПВД; двухкорпусная турбина с межкорпусной сепарацией пара без промежуточного перегрева пара (Лихтеровоз «Севморпуть»)

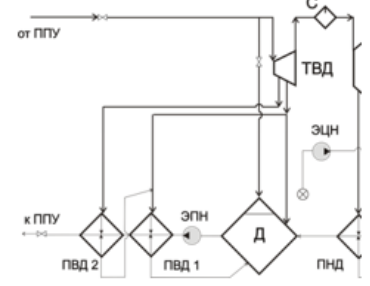


Схема 6 - Регенеративный подогрев питательной воды в ПНД, деаэраторе и двух ПВД; двухкорпусная турбина с межкорпусной сепарацией пара без промежуточного перегрева пара, вспомогательные механизмы с электроприводами

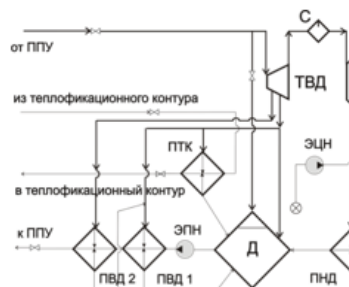


Схема 7 - Регенеративный подогрев питательной воды в ПНД, деаэраторе и двух ПВД; теплофикационный контур; двухкорпусная турбина с межкорпусной сепарацией пара без промежуточного перегрева пара, вспомогательные механизмы с электроприводами (ПЭБ)

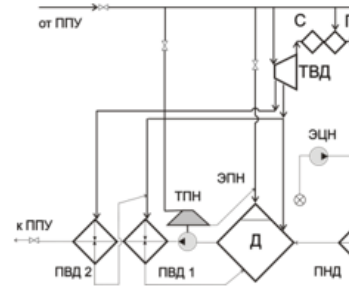


Схема 8 - Регенеративный подогрев питательной воды в ПНД, деаэраторе и двух ПВД; двухкорпусная турбина с межкорпусной сепарацией пара и промежуточным перегревом пар

Рисунок 1.8 Тепловые схемы ПТУ

2. Физико-математическая модель ПТУ

Расчет процессов расширения базируется на вычислениях энтальпии H , энтропии S и удельной теплоемкости c_p при постоянном давлении рабочего тела в зависимости от его температуры T и относительного количества топлива q_T . Таким образом, основными формулами для расчета процессов расширения и сжатия являются:

$$H=f(T, q_T), S=f(T, q_T), C_p=f(T, q_T), R=f(q_T),$$

а также формулы обратных функций: $T=f(H, q_T), T=f(S, q_T)$.

Процесс расширения пара изображен на рис. 2.1 в координатах энтальпия–энтропия.

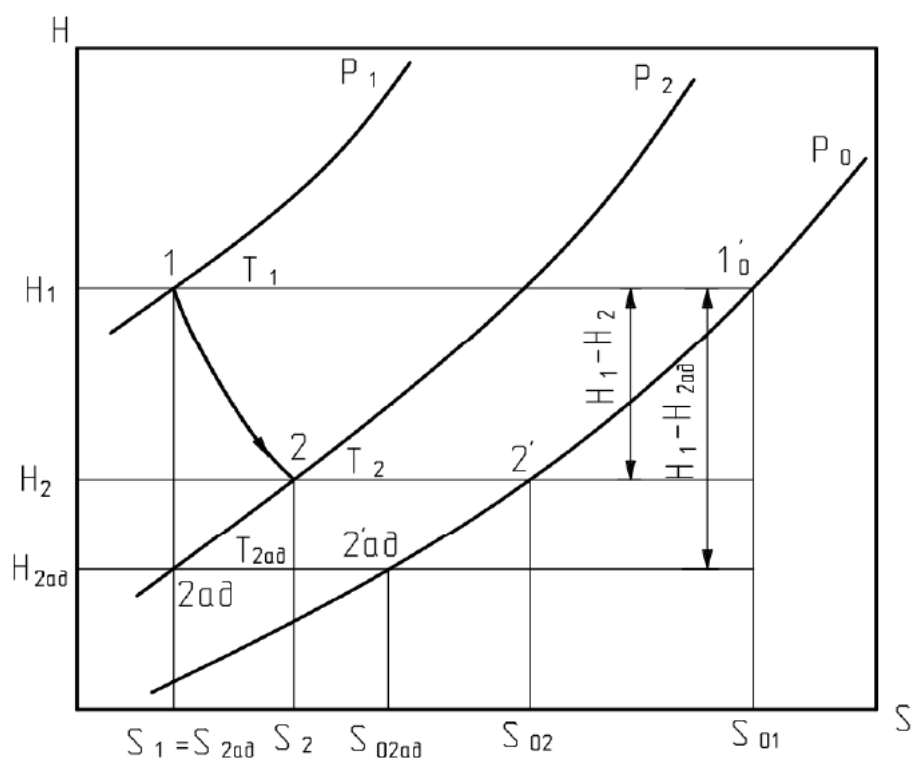


Рисунок 2.1. Процесс расширения пара.

Начальному состоянию на диаграмме соответствует точка 1. В ней первоначально известны температура T_1 , давление P_1 и состав рабочего тела, т.е. значение q_T . По формулам рассчитываются значения H_1 и S_{01} , они на

рис.2.1 изображены разными точками: соответственно 1 и 1', так как энтропия получается при нормальном давлении. Энтропию S_1 в точке 1 тоже можно определить по очевидным формулам:

$$R=f(q_T), S_1=S_{01}-R\ln P_1,$$

После процесса адиабатного расширения газа до давления P_2 его параметры соответствуют точке 2_{ад}, т.к. $S_{2ад} = S_1$,

То можно воспользоваться формулой:

$$S_{2ад}=S_{02ад}-R\ln P_2,$$

$$S_{02ад}-R\ln P_2=S_{01}-R\ln P_1,$$

$$S_{02ад}=S_{01}+R(\ln P_2-\ln P_1)$$

Окончательная расчетная формула $S_{02ад}=S_{01}+R\ln \pi_T$,

По известному значению энтропии $S_{02ад}$ находится температура $T_{2ад}$, т.е.

$$T_{2ад}=f(S_{02ад}, q_T), H_{2ад}=f(T_{2ад}, q_T).$$

Далее необходимо воспользоваться понятием к.п.д. турбины

$$\eta_T = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_{2ад}}.$$

Отсюда расчетная формула для энтальпии и мощности

$$H_2=H_1-(H_1-H_{2ад}) \eta_T, N_T=(H_1-H_2) G,$$

и параметры рабочего тела за ней $T_2=f(H_2, q_T), S_2=f(T_2, q_T)$.

Этот алгоритм пригоден в основном для силовых турбин, у которых известно давление рабочего тела за турбиной.

В турбинах, работающих на привод компрессоров, давление за ними неизвестно, а задается потребная мощность турбины N_T , поэтому алгоритм приходится изменять. Неизменным остается определение параметров в начальной точке 1. Затем потребная работа турбины

$$L_T = \frac{N_T}{G},$$

и энтальпия после процесса расширения $H_2 = H_1 - L_T$.

По ней находится температура в точке 2. $T_2 = f(H_2, q_T)$.

Энтальпия после адиабатного процесса расширения находится по к.п.д. турбины $H_{2ад} = H_1 - \frac{L_T}{\eta_T}$,

а по ней температура и энтропия $T_{2ад} = f(H_{2ад}, q_T)$, $S_{02ад} = f(T_{2ад}, q_T)$.

Разница энтропий $\Delta S = S_{02ад} - S_{01}$

позволяет рассчитать степень понижения давления $\pi_T = e^{\frac{\Delta S}{R}}$.

Отсюда $P_2 = P_1 \pi_T$,

и расчет процесса расширения заканчивается.

Расчет может быть выполнен без характеристик и с использованием характеристик турбины.

3. Методы оптимизации

3.1. Метод покоординатного спуска

Метод покоординатного спуска является простейшим численным методом безусловной оптимизации целевой функции n переменных $f(x)$ и основан на одномерной минимизации функции последовательно по каждой из n переменных. Метод заключается в последовательном проведении одномерного поиска в направлениях каждой из n координатных осей. Для этого задаются единичные векторы – орты координатных осей:

$$e_1=(1, 0, 0, \dots, 0)^T, e_2=(1, 0, 0, \dots, 0)^T, \dots, e_n=(1, 0, 0, \dots, 1)^T.$$

Вначале проводится одномерный поиск из заданной начальной точки x_0 в направлении орта e_1 , и вычисляется точка минимума функции скалярного аргумента $\varphi(\lambda)=f(x_0+\lambda e_1)$

$$\lambda_1=\operatorname{argmin} f(x_0+\lambda e_1)$$

Затем определяется следующая точка поиска

$$x_1= x_0+ \lambda_1 e_1$$

Из точки x_1 проводится одномерный поиск в направлении орта e_2 :

$$\lambda_2=\operatorname{argmin} f(x_1+\lambda e_2), x_2= x_1+ \lambda_2 e_2$$

Аналогично проводится одномерный поиск в направлениях всех остальных ортов. После n таких одномерных поисков получаем точку

$$x_n= x_{n-1}+ \lambda_n e_n$$

На этом первый цикл метода заканчивается, и переходят к следующему циклу. При этом из точки x_n опять проводится одномерный поиск в направлении орта e_1 и так далее. Вычисления производятся до тех пор, пока расстояние между лучшими точками последовательных циклов поиска не превысит заданной допустимой погрешности ε .

Алгоритм метода покоординатного спуска.

Входные параметры: x – начальная точка поиска; $f(x)$ – процедура вычисления функции; ε – допустимая погрешность.

Выходной параметр x – конечная точка поиска.

1. Положить $n = \dim x$.
2. Положить $y = x, i = 1$.
3. Вычислить $\lambda = \operatorname{argmin} f(x + \lambda e_i)$.
4. Положить $x = x + \lambda e_i$.
5. Если $i < n$, то положить $i = i + 1$ и перейти к шагу 3.
6. Если $\|x - y\| > \varepsilon$, то перейти к шагу 2.
7. Остановиться.

В этом алгоритме шаги 3–5 производят последовательный одномерный поиск в направлениях ортов осей координат. Шаги 2–6 составляют итерационный цикл метода. Уменьшение интервала проводится до тех пор, пока точность вычисления параметра λ не превысит заданного малого числа ε_1 . Приведенный алгоритм прост в реализации, но эффективен лишь в случаях, когда целевая функция является Сепарабельной, то есть представляет собой сумму функций, каждая из которых зависит лишь от одной переменной. Блок–схема покоординатного спуска представлена на рисунке 2.1.

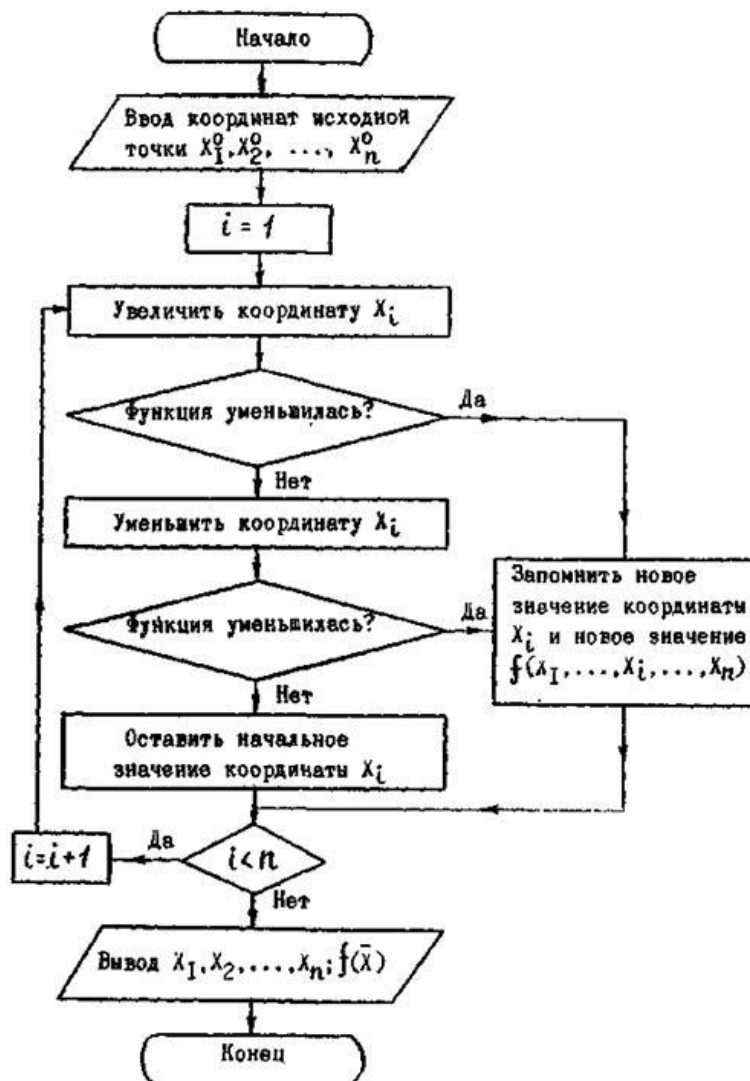


Рисунок 2.1. Блок – схема покоординатного спуска.

Достоинством метода покоординатного спуска является его простота. Недостатком метода является его неэффективность при минимизации овражных функций. Однако это фундаментальный метод многомерной оптимизации, поскольку идея этого метода о последовательном применении одномерного поиска в n направлениях используется в других более эффективных методах оптимизации.[7]

Метод покоординатного спуска и его модификации также называют методом циклического покоординатного поиска, циклическим координатным методом, методом Гаусса-Зейделя, методом локальных вариаций.[10]

3.2. Метод золотого сечения

Метод золотого сечения также является последовательным методом минимизации. Опираясь на свойства золотого сечения отрезка, этот метод использует найденные значения $F(X)$ более рационально, чем метод деления отрезка пополам, что позволяет переходить к очередному отрезку, содержащему точку X^* после вычисления одного, а не двух значений $F(X)$.

Метод основан на делении текущего отрезка $[A; B]$, где содержится искомый экстремум, на две неравные части, подчиняющиеся правилу золотого сечения, для определения следующего отрезка, содержащего максимум.

Если известно, что функция $f(x)$ унимодальная на отрезке $[a, b]$, то положение точки минимума можно уточнить, вычислив $f(x)$ в двух внутренних точках отрезка. При этом возможны две ситуации:

если $f(x_1) < f(x_2)$, то минимум реализуется на отрезке $[a, x_2]$,

если $f(x_1) > f(x_2)$, то минимум реализуется на отрезке $[x_1, b]$.

В методе золотого сечения каждая из точек x_1 и x_2 делит исходный интервал на две части так, что отношение целого к большей части равно отношению большей части к меньшей, т.е. равно так называемому "золотому отношению". Это соответствует следующему простому геометрическому представлению (рис. 2.2):

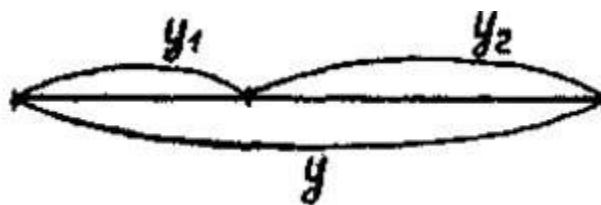


Рисунок 2.2. «Золотое отношение».

Здесь

$$\frac{y}{y_2} = \frac{y_2}{y_1} \quad \text{или} \quad \frac{y}{y-y_1} = \frac{y-y_1}{y_1}$$

Обозначив

$$\frac{y_1}{y} = z$$

Получаем

$$\frac{1}{1-z} = \frac{1-z}{z}$$

Откуда

$$z = \frac{3 - \sqrt{5}}{2} \approx 0,382$$

Итак, длины отрезков $[a, x_1]$ и $[x_2, b]$ одинаковы и составляют 0,382 от длины (a, b) . Значениям $f(x_1)$ и $f(x_2)$ определяется новый интервал (a, x_2) или (x_1, b) , в котором локализован минимум. Найденный интервал снова делится двумя точками в том же отношении, причем одна из новых точек деления совпадает с уже использованной на предыдущем шаге.

Таким образом, длина интервала неопределенности на каждом шаге сжимается с коэффициентом 0,618. На первом шаге необходимы два вычисления функции, на каждом последующем - одно.

Длина интервала неопределенности после S вычислений значений $f(x)$ составляет:

$$L = 0,618^{S-1}(b-a)$$

Алгоритм метода золотого сечения для минимизации функции $f(x)$ складывается из следующих этапов:

1. Вычисляется значение функции $f(x_1)$, где $x_1 = a + 0,382(b-a)$.
2. Вычисляется значение функции $f(x_2)$, где $x_2 = b - 0,382(b-a)$.
3. Определяется новый интервал (a, x_2) или (x_1, b) , в котором локализован минимум.
4. Внутри полученного интервала находится новая точка (x_1 в случае 1) или (x_2 в случае 2), отстоящая от его конца на расстоянии,

составляющем 0,382 от его длины. В этой точке рассчитывается значение $f(x)$. Затем вычисления повторяются, начиная с пункта 3, до тех пор, пока величина интервала неопределенности станет меньше или равна ε , где ε - заданное сколь угодно малое положительное число.

На рис. 2.3 представлена блок-схема алгоритма поиска минимума функции методом золотого сечения.

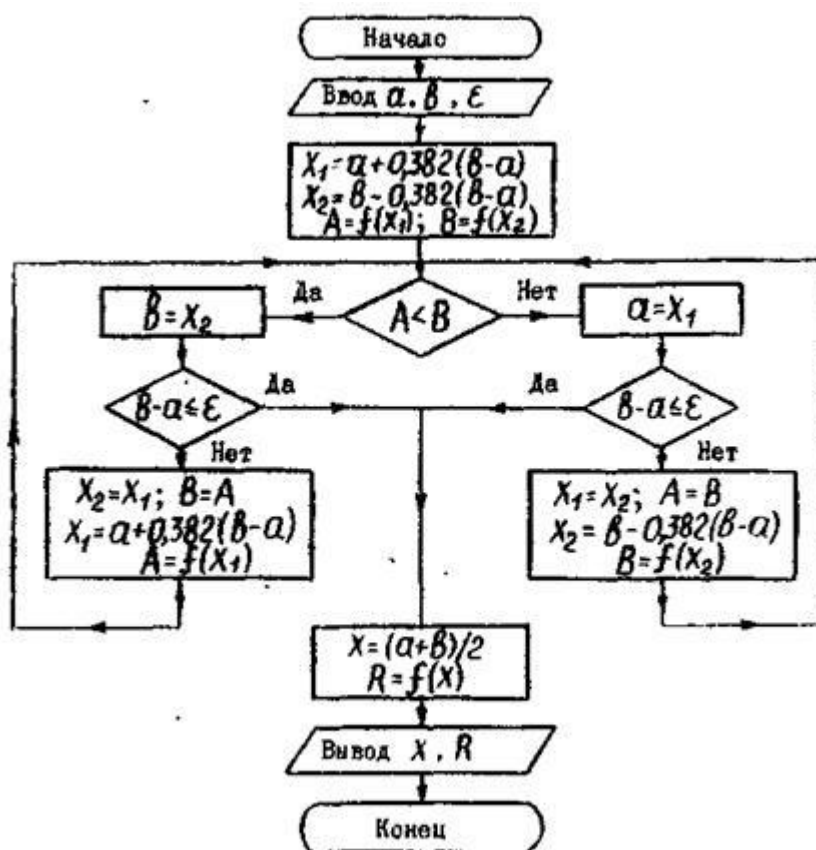


Рисунок 2.3. Блок-схема алгоритма поиска минимума функции методом золотого сечения.

Метод золотого сечения обеспечивает более быструю сходимость к решению, чем многие другие методы, и применим, очевидно, только для одноэкстремальных функций, т. е. функций, содержащих один экстремум того типа, который ищется в задаче.[9]

4. Оптимизация термодинамических параметров ПТУ

4.1. Метод покоординатного спуска для расчета оптимальных значений начального давления и температуры питательной воды

Оптимизация термодинамических параметров ПТУ будет реализована в программе Mathcad 15.

1. Постановка задачи

Паротурбинная установка с одним регенеративным подогревателем работает по идеальному циклу Ренкина на насыщенном паре с заданным значением конечным давлением P_k .

Найти оптимальные параметры ПТУ: давление пара P_0 , и температуру питательной воды $t_{п.в.}$, соответствующие максимальному значению термического КПД при изменении P_0 от давления пара в конденсаторе P_k до критического давления ≈ 22 МПа и изменении $t_{п.в.}$ – от температуры насыщения при конечном давлении до температуры насыщения острого пара.

2. Качественное и математическое описание задачи

Целевая функция – термический КПД η_T паротурбинной установки; оптимизируемые параметры – начальное давление свежего пара P_0 и температура питательной воды $t_{п.в.}$;

размерность оптимизационной задачи равна двум по числу оптимизируемых параметров;

ограничения на оптимизируемые параметры:

$$P_k \leq P_0 \leq 22 \text{ (МПа)};$$

$$t_{к.с.} \leq t_{п.в.} \leq T_0,$$

где

$$t_{к.с.} = f(P_k), T_0 = f(P_0).$$

Схема паротурбинной установки с регенеративным подогревателем смешивающего типа представлена на рис. 3.1, соответствующий ей процесс расширения пара в h,S -диаграмме – на рис. 3.2.

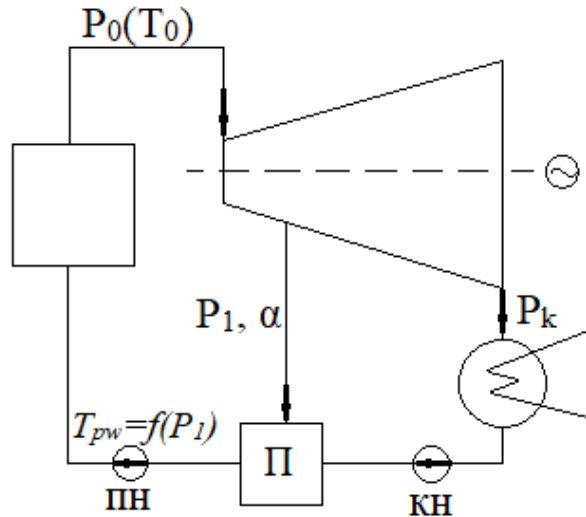


Рисунок 3.1. Схема ПТУ с одноступенчатым регенеративным подогревом.

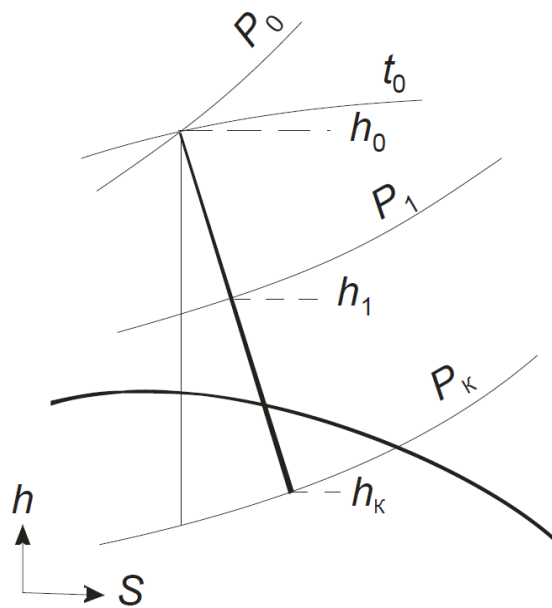


Рисунок 3.2. Процесс расширения пара в турбине с регенеративным отбором.

2. Моделирование целевой функции

Из теории термодинамики известен экстремальный характер функции по обоим оптимизируемым параметрам. Зависимость $\eta_t = f(t_{n.e.})$ имеет параболический характер (рис. 3.3)[14].

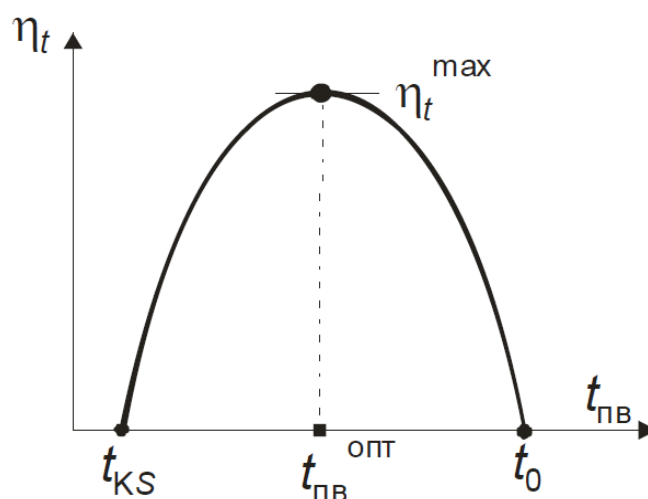


Рисунок 3.3. Зависимость термического КПД цикла Ренкина от температуры питательной воды.

Сведем задачу поиска максимума целевой функции к задаче минимизации, приняв за целевую функцию отрицательное значение КПД. Решение задачи будем искать методом координатного спуска.

Для расчета целевой функции воспользуемся готовой программой расчета термического КПД ПТУ с одним регенеративным подогревателем. Программа написана с помощью модуля WaterSteamPro – программы для расчета свойств воды, водяного пара, газов и смесей газов.[16]

Программа расчета термического КПД $KPD_T(p_0, p_k, T_{pw}, KPD_d, KPD_n)$ представлена на рис 3.3. Функция вычисления термического КПД по p_0 и T_{pw} $KPD_{xy}(p_0, T_{pw})$ представлена на рис. 3.4. Параметры p_0 и T_{pw} – оптимизируемые, остальные (p_k, KPD_d, KPD_n) должны быть заданы в качестве исходных данных (рис 3.5).

$$\begin{array}{l}
\text{KPD}_T(p_\theta, p_k, T'_{pw}, \text{KPD}_d, \text{KPD}_n) := \left\{ \begin{array}{l}
T_\theta \leftarrow \text{wspTSP}(p_\theta) \\
p_1 \leftarrow \text{wspPST}(T'_{pw}) \\
h'_{pn} \leftarrow \text{wspHSWT}(T'_{pw}) \\
h'_{ks} \leftarrow \text{wspHSWT}(T'_{ks}) \\
h \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_\theta, T_\theta, p_1, \text{KPD}_d) \\
T \leftarrow \text{wspTPH}(p_1, h) \\
h''_{pn} \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}\left(p_1, T'_{pw}, 0, p_\theta, \frac{1}{\text{KPD}_n}\right) \\
h''_{ks} \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}\left(p_k, \text{wspTSP}(p_k), 0, p_1, \frac{1}{\text{KPD}_n}\right) \\
\alpha \leftarrow \frac{h'_{pn} - h''_{ks}}{h - h''_{ks}} \\
h_\theta \leftarrow \text{wspHPT}(p_\theta, T_\theta) \\
l_T \leftarrow 1 \cdot (h_\theta - h) + (1 - \alpha)(h - \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_1, T, p_k, \text{KPD}_d)) \\
l_N \leftarrow (1 - \alpha)(h''_{ks} - h'_{ks}) + 1(h''_{pn} - h'_{pn}) \\
q_1 \leftarrow h_\theta - h''_{pn} \\
\frac{l_T - l_N}{q_1}
\end{array} \right.
\end{array}$$

Рисунок 3.3. Программа расчета термического КПД.

$$\begin{array}{ll}
p_k := 4 \cdot 10^3 \text{ Pa} & \text{KPD}_d := 1 \\
T'_{ks} := \text{wspTSP}(p_k) = 302.112 \text{ K} & \text{KPD}_n := 1
\end{array}$$

Рисунок 3.4. Исходные данные к программе.

Функция вычисления КПД по p_θ, T'_{pw} :

$$\text{KPD}_{xy}(p_\theta, T'_{pw}) := -\text{KPD}_T(p_\theta, p_k, T'_{pw}, \text{KPD}_d, \text{KPD}_n)$$

Рисунок 3.5. Функция вычисления термического КПД по p_θ и T'_{pw} .

4. Моделирование оптимизационной задачи

Программа расчета методом покоординатного спуска приведена на рис.

3.8. Для одномерной минимизации используется метод «золотого» сечения (рис. 3.7)

Золотое сечение:

```
goldenRatio(f, v, x, a, b, eps) :=
  y ← 0.618 · a + 0.382 · b
  z ← 0.618 · b + 0.382 · a
  if v = 1
    fy ← f(y, x)
    fz ← f(z, x)
    while b - a > eps
      if fy < fz
        b ← z
        z ← y
        fz ← fy
        y ← 0.618 · a + 0.382 · b
        fy ← f(y, x)
      otherwise
        a ← y
        y ← z
        fy ← fz
        z ← 0.382 · a + 0.618 · b
        fz ← f(z, x)
  otherwise
    fy ← f(x, y)
    fz ← f(x, z)
    while b - a > eps
      if fy < fz
        b ← z
        z ← y
        fz ← fy
        y ← 0.618 · a + 0.382 · b
        fy ← f(x, y)
      otherwise
        a ← y
        y ← z
        fy ← fz
        z ← 0.382 · a + 0.618 · b
        fz ← f(x, z)
  
$$\frac{(a + b)}{2}$$

```

Рисунок 3.7. Программа оптимизации одномерных функций методом «золотого сечения».

Покоординатный спуск с использованием золотого сечения:

```
coordinateDescent(f, x0, y0, pleft, pright, eps1, eps2) :=
  k ← 0
  x1 ← goldenRatio(f, 1, y0, pleft, pright, eps1)
  y1 ← goldenRatio(f, 2, x1, T'ks, 473.15, eps2)
  while |x1 - x0| > eps1 ∧ |y1 - y0| > eps2
    k ← k + 1
    x0 ← x1
    y0 ← y1
    x1 ← goldenRatio(f, 1, y0, pleft, pright, eps1)
    y1 ← goldenRatio(f, 2, x1, T'ks, 473.15, eps2)
  (
    x0
    y0
    f(x0, y0)
    k
  )
```

Рисунок 3.8. Программа поиска оптимума методом покоординатного спуска.

Ввод ограничений на параметры и точности оптимизации и вывод результатов оптимизации представлены на рис. 3.9 и рис. 3.10 соответственно.

Границы значений:

$$\begin{aligned}
 p_{\min} &:= p_k & \text{EPS}_1 &:= 1 \\
 p_{\max} &:= 22 \cdot 10^6 \text{ Pa} & \text{EPS}_2 &:= 0.1 \\
 p_{\text{avg}} &:= \text{median}(p_{\min}, p_{\max}) = 1.1 \times 10^7 \text{ Pa} \\
 t_{\text{avg}} &:= \text{median}(378.15, T'_{ks}) = 340.131 \text{ K}
 \end{aligned}$$

Рисунок 3.9. Ввод ограничений на параметры и точности оптимизации.

Вычисление максимального КПД:

$$\text{answer} := \text{coordinateDescent}(KPD_{xy}, p_{\text{avg}}, t_{\text{avg}}, p_{\min}, p_{\max}, \text{EPS}_1, \text{EPS}_2) = \begin{pmatrix} 4.601 \times 10^6 \\ 473.111 \\ -0.341 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$KDPD_{\max} := -KPD_{xy}(\text{answer}_0, \text{answer}_1) = 0.341$$

$$p_0 := \text{answer}_0 = 4.600991 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$T'_{pw} := \text{answer}_1 = 473.111 \text{ K}$$

Рисунок 3.10. Вывод результатов оптимизации.

4.2. Метод покоординатного спуска для расчета оптимальных значений давлений регенеративного отбора

1. Постановка задачи

Найти оптимальные параметры ПТУ с двумя регенеративными подогревателями: давление пара P_1 , и давление пара P_2 , соответствующие максимальному значению термического КПД при изменении P_1 и P_2 от начального давления пара P_0 до критического давления ≈ 22 МПа.

2. Качественное и математическое описание задачи

Целевая функция – термический КПД η_T паротурбинной установки;

оптимизируемые параметры – давления отбираемого пара P_1 и P_2 ;

размерность оптимизационной задачи равна двум по числу оптимизируемых параметров;

ограничения на оптимизируемые параметры:

$$P_k \leq P_2 \leq P_1 \leq 22 \text{ (МПа)};$$

$$t_{кs} \leq t_{н.в.} \leq T_0,$$

где

$$t_{кs} = f(P_k), T_0 = f(P_0).$$

Схема паротурбинной установки с двумя регенеративными подогревателями смешивающего типа представлена на рис. 3.11, соответствующий ей термодинамический цикл – на рис. 3.12.

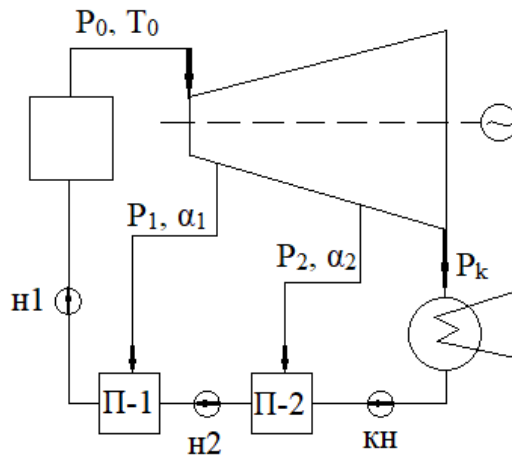


Рисунок 3.11. Схема ПТУ с двухступенчатым регенеративным подогревом.

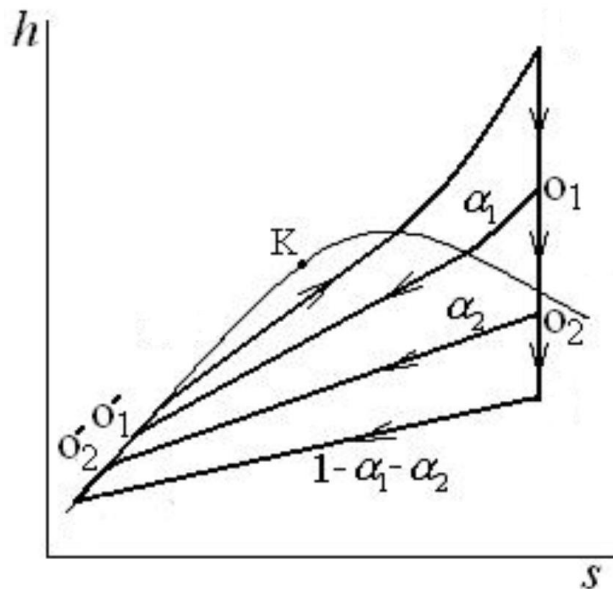


Рисунок 3.12. Термодинамический цикл паротурбинной установки с двумя регенеративными отборами.

2. Моделирование целевой функции

Из теории термодинамики известно о росте внутреннего КПД с увеличением количества отборов воды для регенеративного подогрева (рис. 3.13)[14].

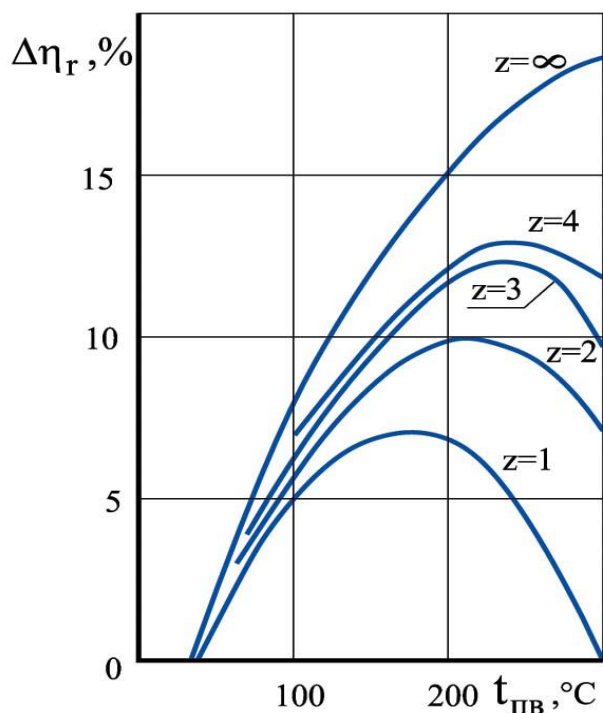


Рисунок 3.13. Зависимость относительного повышения внутреннего КПД от температуры питательной воды и числа регенеративных подогревателей.

Сведем задачу поиска максимума целевой функции к задаче минимизации, приняв за целевую функцию отрицательное значение КПД. Решение задачи будем искать методом координатного спуска.

Для расчета целевой функции воспользуемся готовой программой расчета термического КПД ПТУ с двумя регенеративными подогревателями. Программа так же написана с помощью модуля WaterSteamPro – программы для расчета свойств воды, водяного пара, газов и смесей газов.

Программа расчета термического КПД $KPD_T(p_0, T_0, p_k, p_1, p_2, KPD_d, KPD_n)$ представлена на рис 3.14. Функция вычисления термического КПД по p_1 и p_2 $KPD_{xy}(p_1, p_2)$ представлена на рис. 3.15. Параметры p_1 и p_2 – оптимизируемые, остальные ($p_0, T_0, p_k, KPD_d, KPD_n$) должны быть заданы в качестве исходных данных (рис. 3.16).

$$\begin{aligned}
\text{KPD}_t(p_0, T_0, p_k, p_1, p_2, \text{KPD}_d, \text{KPD}_n) := & \left\{ \begin{array}{l}
\Gamma_{s1} \leftarrow \text{wspTSP}(p_1) \\
h'_{s1} \leftarrow \text{wspHSWI}(\Gamma_{s1}) \\
\Gamma_{s2} \leftarrow \text{wspTSP}(p_2) \\
h'_{s2} \leftarrow \text{wspHSWI}(\Gamma_{s2}) \\
\Gamma_{ks} \leftarrow \text{wspTSP}(p_k) \\
h'_{ks} \leftarrow \text{wspHSWI}(\Gamma_{ks}) \\
h_1 \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_0, T_0, p_1, \text{KPD}_d) \\
h_2 \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_0, T_0, p_2, \text{KPD}_d) \\
h_k \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTPEFF}(p_0, T_0, p_k, \text{KPD}_d) \\
h''_{s1} \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}\left(p_1, \Gamma_{s1}, 0, p_0, \frac{1}{\text{KPD}_n}\right) \\
h''_{s2} \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}\left(p_2, \Gamma_{s2}, 0, p_1, \frac{1}{\text{KPD}_n}\right) \\
h''_{ks} \leftarrow \text{wspHEXPANSIONPTXPEFF}\left(p_k, \Gamma_{ks}, 0, p_2, \frac{1}{\text{KPD}_n}\right) \\
\alpha_1 \leftarrow \frac{h'_{s1} - h''_{s2}}{h_1 - h''_{s2}} \\
\alpha_2 \leftarrow \frac{(h'_{s2} - h''_{ks}) \cdot (1 - \alpha_1)}{h_2 - h''_{ks}} \\
h_0 \leftarrow \text{wspHPT}(p_0, T_0) \\
l_T \leftarrow 1 \cdot (h_0 - h_1) + (1 - \alpha_1)(h_1 - h_2) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (h_2 - h_k) \\
l_N \leftarrow (1 - \alpha_2 - \alpha_1) \cdot (h''_{ks} - h'_{ks}) + (1 - \alpha_1) \cdot (h''_{s2} - h'_{s2}) + 1 \cdot (h''_{s1} - h'_{s1}) \\
q_1 \leftarrow h_0 - h''_{s1} \\
\frac{l_T - l_N}{q_1}
\end{array} \right.
\end{aligned}$$

Рисунок 3.14. Программа расчета термического КПД.

$$\begin{aligned}
p_0 &:= 5 \cdot 10^6 & \text{KPD}_d &:= 1 \\
T_0 &:= \text{wspTSP}(p_0) = 537.093 & \text{KPD}_n &:= 1 \\
p_k &:= 4 \cdot 10^3
\end{aligned}$$

Рисунок 3.15. Исходные данные к программе.

Функция вычисления КПД по p_1, p_2 :

$$\text{KPD}_{xy}(p_1, p_2) := -\text{KPD}_t(p_0, T_0, p_k, p_1, p_2, \text{KPD}_d, \text{KPD}_n)$$

Рисунок 3.16. Функция вычисления термического КПД по p_1 и p_2 .

4. Моделирование оптимизационной задачи

Программа расчета методом покоординатного спуска приведена на рис. 3.17. Для одномерной минимизации используется метод «золотого» сечения (рис.3.7).

Покоординатный спуск с использованием золотого сечения:

```

coordinateDescent(f, x0, y0, Pleft, Pright, eps) :=
  k ← 0
  x1 ← goldenRatio(f, 1, y0, Pleft, Pright, eps)
  y1 ← goldenRatio(f, 2, x1, Pleft, Pright, eps)
  while |x1 - x0| > eps ∧ |y1 - y0| > eps
    k ← k + 1
    x0 ← x1
    y0 ← y1
    x1 ← goldenRatio(f, 1, y0, Pleft, Pright, eps)
    y1 ← goldenRatio(f, 2, x1, Pleft, Pright, eps)
  (
    x0
    y0
    f(x0, y0)
    k
  )
  
```

Рисунок 3.17. Программа поиска оптимума методом покоординатного спуска.

Ввод ограничений на параметры и точности оптимизации и вывод результатов оптимизации представлены на рис. 3.18 и рис. 3.19 соответственно.

Границы значений:

$$\begin{aligned}
 P_{\min} &:= P_k & \text{EPS} &:= 1 \\
 P_{\max} &:= 22 \cdot 10^6 & P_a & \\
 P_{\text{avg}} &:= \text{median}(P_{\min}, P_{\max}) = 1.1 \times 10^7 & P_a &
 \end{aligned}$$

Рисунок 3.18. Ввод ограничений на параметры и точности оптимизации.

Вычисление максимального КПД:

$$\text{answer} := \text{coordinateDescent}(\text{KPD}_{xy}, P_{avg}, P_{avg}, P_{min}, P_{max}, \text{EPS}) = \begin{pmatrix} 9.861 \times 10^5 \\ 1.017 \times 10^5 \\ -0.41 \\ 10 \end{pmatrix}$$
$$\text{KPD}_{max} := -\text{KPD}_{xy}(\text{answer}_0, \text{answer}_1) = 0.41$$
$$p_1 := \text{answer}_0 = 9.861 \times 10^5 \text{ Pa}$$
$$p_2 := \text{answer}_1 = 1.017 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Рисунок 3.19. Вывод результатов оптимизации.

4.3 Результаты расчетов оптимизации

Для схемы с одним регенеративным подогревателем при заданных параметрах $p_k=4$ кПа, $\text{KPD}_d=1$, $\text{KPD}_n=1$ оптимальными начальными параметрами являются $T_{п.в.}=473,1$ К, $p_0=4,6$ МПа. КПД ПТУ при этих параметрах – $\text{KPD}_T=0,34$.

Для схемы с двумя регенеративными подогревателями при заданных параметрах $p_0=5$ МПа, $T_0=537.1$ К $p_k=4$ кПа, $\text{KPD}_d=1$, $\text{KPD}_n=1$ оптимальными параметрами давления отборов являются $p_1=986,1$ кПа, $p_2=101,7$ кПа. КПД ПТУ при этих параметрах – $\text{KPD}_T=0,41$.

Заключение

В настоящее время, для увеличения объемов добываемого сырья в Арктике, необходимо улучшение транспортной доступности и расширение сроков навигации для круглогодичной работы.

И если для успешного развития грузоперевозок и обеспечения безопасного судоходства в акватории СМП, ведется активное строительство новых универсальных атомных ледоколов, то для увеличения их эффективности работы необходима оптимизация установленных на них силовых установок.

В результате выполненной работы были решены следующие задачи:

- разработана математическая модель, в основе которой лежит баланс потоков масс и энергий в цикле паротурбинной установки;
- выбраны методы оптимизации;
- реализована программа для выбранных методов оптимизации.

Математическая модель была разработана для двух схем ПТУ: с одним и двумя регенеративными подогревателями. Двумерная оптимизация проводилась методом покоординатного спуска, для одномерной оптимизации был использован метод «золотого сечения».

Список литературы

1. Аксельбант А.М. Судовые энергетические установки. Л.: Судостроение, 1970 г.
2. Аттетков, А.В. Методы оптимизации: Учебное пособие / А.В. Аттетков, В.С. Зарубин, А.Н. Канатников. - М.: Риор, 2016. - 48 с.
3. Верете А. Г., Дельвинг А.К. Судовые паровые и газовые энергетические установки: Учеб. для мореход. училищ. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с.
4. Дядик А.Н., Сурин С.Н. Энергетика атомных судов. – СПб.: Судостроение, 2014. - 476 с.
5. Зайцев Ю.И. Основы теории и проектирования судовых паротурбинных установок, Л.: Судостроение, 1974 г.
6. Занин А. И., Соколов В. С. 3-27 Паровые турбины; Учеб. пособие для СПТУ. — М.: Высш. шк., 1988.—208 с.
7. Измаилов, А.Ф. Численные методы оптимизации: Учебное пособие / А.Ф. Измаилов, М.В. Солодов. - М.: Физматлит, 2008. - 320 с.
8. Кашка М.М., Ирлица Л.А., Ефанская Е.А., Матвишина К.А., Головинский С.А. Роль атомного ледокольного флота в достижении национальной задачи по увеличению объема грузопотока в акватории Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, — № 1. — С. 101-110.
9. Келлер, И.Э. Методы оптимизации в примерах и задачах: Учебное пособие / И.Э. Келлер. - СПб.: Лань, 2015. - 512 с.
10. Корнеенко, В.П. Методы оптимизации. / В.П. Корнеенко. - М.: Высшая школа, 2007. - 664 с.
11. Кузнецов В.А. Судовые ядерные энергетические установки: Учебник.- Л.: Судостроение, 1989. – 256 л.

12. Указ Президента РФ от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

13. Шатровский Д.А. Паротурбинные установки атомных судов. Главные турбоагрегаты и вспомогательные турбомеханизмы.: Учебное пособие.- М.: В/О «МОРТЕХИНФОРМРЕКЛАМА», 1990 г. – 56 л.

14. Шатровский Д.А. Паротурбинные установки атомных судов. Основы термодинамики и тепловые циклы. - М.: В/О «Мортехинформреклама», 1990.–54 с.

Интернет-ресурсы:

15. <https://icebreakers.tass.ru/dolgij-put-na-sever/ot-ermaka-do-sovremennyh-atomohodov>

16. <http://www.wsp.ru/ru/>