

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е.А. Бойко

подпись

инициалы, фамилия

«___»

20 __ Г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код-наименование направления

Проект реконструкции Красноярской ТЭЦ-3

тема

Руководитель

подпись, дата

профессор, д.т.н.

должность, ученая степень

Е.А. Бойко

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

К.В. Лебедев

инициалы, фамилия

Тех. контроль

подпись, дата

Е.А. Бойко

инициалы, фамилия

Нормконтролер

подпись, дата

П.В. Шишмарев

инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е.А. Бойко

подпись

инициалы, фамилия

«___»

20 __ Г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы**

Красноярск 2023

Студенту

Лебедеву Константину Викторовичу

фамилия, имя, отчество

Группа

ФЭ19-01Б

номер

Направление (специальность)

13.03.01

код

Теплоэнергетика и теплотехника

полное наименование

Тема выпускной квалификационной работы

Проект реконструкции

Красноярской ТЭЦ-3

Утверждена приказом по университету № 7937/с от 23.05.2023

Руководитель ВКР

Е.А. Бойко, профессор, доктор техн. наук, кафедра ТЭС

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР

Производственная инструкция по

эксплуатации ТПЕ-216; проблема, сформулированная главным инженером в

печатном виде; комплект чертежей ТПЕ-216; решение предложенное ПАО

ТКЗ «Красный котельщик».

Перечень разделов ВКР

Вводная часть; обоснование реконструкции и

формулировка цели; описание программного продукта; расчетная часть и

сравнительный анализ; расчет срока окупаемости оптимального варианта.

Перечень графического материала

Лист 1. Продольный разрез котла ТПЕ-216

Лист 2. Поперечный разрез котла ТПЕ-216

Лист 3. Вид сверху на котел ТПЕ-216

Лист 4. Вид на группу КПП НД до и после реконструкции

Руководитель ВКР

подпись

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись, инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 20 ____ г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Проект реконструкции Красноярской ТЭЦ-3» содержит 91 страницу текстового документа, 52 иллюстрации, 11 таблиц, 9 использованных источников, 4 листа графического материала.

Ключевые слова: РЕКОНСТРУКЦИЯ, КОТЕЛ ТПЕ-16, ТЕМПЕРАТУРА СТЕНКИ, ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ, ООП, ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ, ОПТИМАЛЬНЫЙ ВАРИАНТ, ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ.

Объект реконструкции – Красноярская ТЭЦ-3.

Цель проекта:

- Устранить проблему перегрева регулировочной ступени КПП НД;
- Сохранить при всех режимах работы температуру первичного и вторичного пара – 545 °С.

В данной ВКР рассмотрены варианты реконструкции котла ТПЕ-216 с целью устранения технической проблемы. Для осуществления множества расчетов и сравнения их результатов было разработано специализированное программное обеспечение. По полученным данным и проведенному анализу чувствительности для необходимых температур были отобраны несколько вариантов из которых был выбран оптимальный. Для оптимального варианта произведен расчет окупаемости.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Обоснование реконструкции энергетического объекта.....	5
1.1 Опыт эксплуатации (надежность, экономические затраты)	5
1.2 Описание объекта реконструкции	7
1.3 Обоснование технических решений реконструкции	10
1.4 Цели и задачи	10
1.5 Программное обеспечение для расчета котельного агрегата	11
2 Описание программного продукта.....	12
2.1 Обзор существующего программного обеспечения	12
2.2 Описание нового ПО	15
2.2.1 Общие сведения.....	15
2.2.2 Описание логической структуры.....	16
2.2.3 Описание математического подхода.....	27
2.2.4 Вызов и загрузка.....	31
2.2.5 Входные данные	34
2.2.6 Выходные данные	38
2.2.7 Расчет в программе на примере заводской схемы котла ТПЕ-216	40
3 Расчетная часть.....	58
3.1 Анализ чувствительности для необходимых температур и выбор предпочтительных вариантов.....	58
3.2 Расчет температуры стенки для вариантов.....	61
3.3 Выбор оптимального варианта.....	64
3.4 Аэродинамический расчет	78
4 Экономическая часть	86
4.1 Расчет экономии на уменьшении собственных нужд.....	86
4.2 Расчет экономии на топливе.....	86
4.3 Расчет увеличения прибыли за счет уменьшения простоя в ремонте	86
4.4 Годовая экономия	87
4.5 Расчет затрат на монтаж.....	87
4.6 Расчет срока окупаемости.....	87
Заключение	90
Список использованных источников	91

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность работы предприятий зависит от аварийности и потерь, возникающих в процессе эксплуатации основного и вспомогательного оборудования. Несовершенство технологических процессов обусловлено физическим и моральным износом и недостаточностью финансовых ресурсов для поддержания основных фондов в нормальном состоянии.

Важнейшее преимущество реконструкции и технического перевооружения перед новым строительством состоит в том, что повышение технико-эксплуатационных и технико-экономических показателей отдельных участков производства, агрегатов, установок достигается меньшими финансовыми затратами. Возможность использования действующих зданий, сооружений и коммуникаций позволяет направлять больше средств на приобретение нового оборудования, на совершенствование технологии и организации производства.

Как правило, возможности любой реконструкции всегда жестко ограничены, поэтому требуются научно обоснованный, сравнительный анализ различных вариантов замещающих технологических схем, рассмотрение всех “плюсов” и “минусов” этих вариантов, их технико-экономическая оценка и, в конечном итоге, окончательный выбор наиболее рационального (оптимального) варианта.

В рамках рассматриваемой реконструкции котла, проблемой, требующей внимания, является высокая температура стенки пароперегревателя. Температура пара промежуточного перегрева при номинальной нагрузке (670 т\ч) выше области использования температуры металла трубы. Это приводит к ряду негативных последствий, таких как снижение надежности работы, пережог труб, приводящий к аварийному останову и повышенные затраты на обслуживание.

В связи с вышеизложенным, в данном дипломном проекте ставится задача разработки комплексного подхода для решения проблемы и обеспечения безопасной эксплуатации котла КТЭЦ-3 Еп-670-13,8-545БТ (ТПЕ-216).

1 Обоснование реконструкции энергетического объекта

1.1 Опыт эксплуатации (надежность, экономические затраты)

Проблема надежности занимает одно из центральных мест в функционировании и планировании развития энергетических систем и электростанций.

Поверхности нагрева, а в данном случае пароперегреватель является наименее надежным элементом котельного оборудования (см. рисунок 1), что связано с многообразием факторов, влияющих на условия работы металла, когда их сочетание создает такое напряженно-деформированное состояние, которое приводит к разрушениям. Хотя опасности для обслуживающего персонала электростанций эти повреждения не несут, но происходит прекращение работы энергоблока в среднем на двое, трое суток и создаются условия работы, которые способствуют преждевременному износу всего энергоблока.

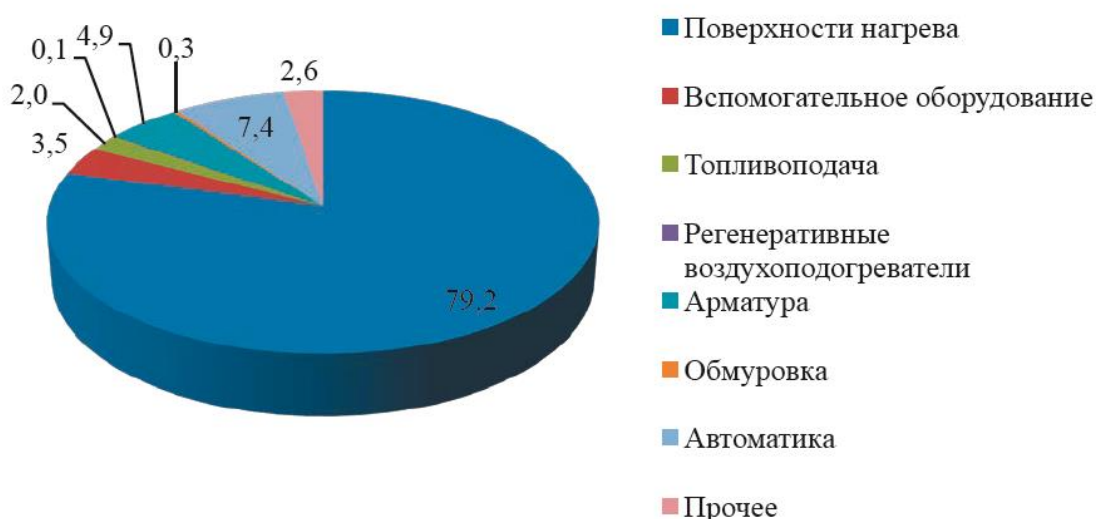
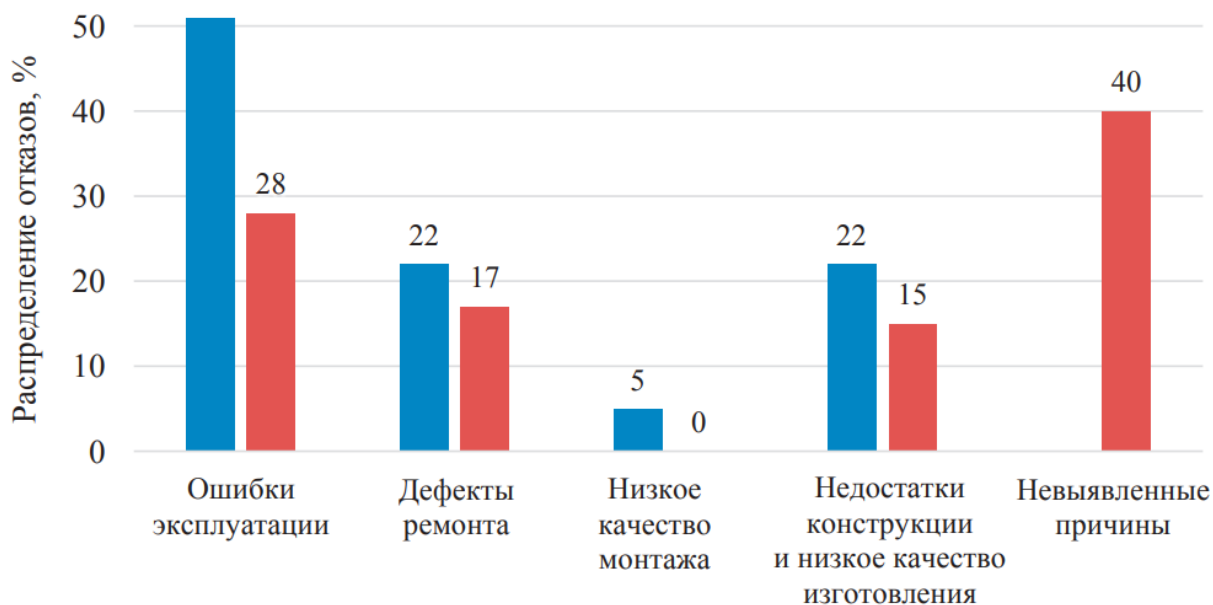


Рисунок 1 – Распределение отказов котельного оборудования

Типовые отказы теплотехнического оборудования можно классифицировать по следующим группам (см. рисунок 2):

- из-за недостатка конструкции и низкого качества изготовления;
- ошибок эксплуатации;
- низкого качества монтажа;
- дефектов ремонта.

Недостатки конструкции обусловлены несовершенством конструкторской и нормативно-технической документации (НТД), методами расчета и математического моделирования, ошибками в расчетах.



Левый столбец – котельное оборудование; правый – турбинное оборудование

Рисунок 2 – Распределение причин отказов теплотехнического оборудования, %.

В данном котле проблему перегрева стенки КПП НД-1, выполненного из стали 12Х1МФ, можно отнести к недостаткам конструкции, поскольку заводской конструкторский расчет котлоагрегата предполагает работу пароперегревателя в более высокой области температур (свыше 591 °С) чем позволяет работа стали 12Х1МФ, максимальная рабочая температура которой составляет 585 °С. Заметное влияние оказывает приводящее к тепловым перекосам неравномерное поле температур по высоте газохода, пароперегреватели повреждаются еще и потому, что при длительных наработках времени при температурах выше 500 °С структура металла претерпевает изменения. Снижается его жаропрочность из-за процесса сфероидизации цемента из пластинчатой структуры. Появляются остаточные деформации и разрушения.

Таким образом основной причиной отказа является перегрев (ползучесть), что также подтверждается статистикой отказа поверхностей нагрева (см. рисунок 3). Несоответствие расчетных температур фактическим рабочим температурам стали пароперегревателя свидетельствует либо о допущенной ошибке на стадии конструкторского расчета завода изготовителя, либо о неправильно выбранной марке стали пароперегревателя.

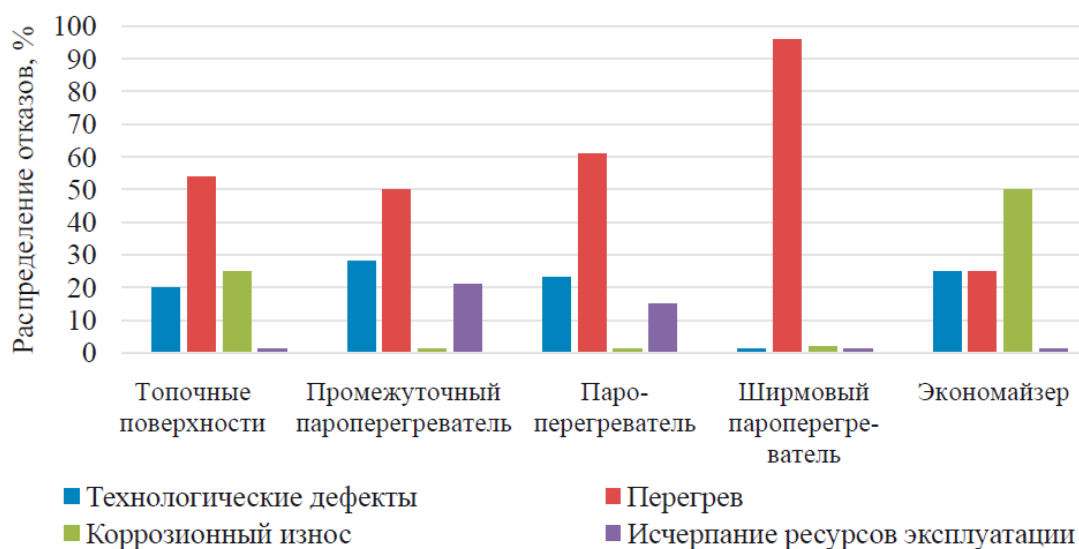


Рисунок 3 – Распределение отказов поверхностей нагрева

В этих условиях актуальной задачей является разработка мер по устранению проблемы перегрева и повышению надежности работы пароперегревателя. Это представляется оптимальным как с точки зрения обеспечения стабильной эксплуатации, так и с точки зрения достижения экономической эффективности.

1.2 Описание объекта реконструкции

Котел типа Е-670-13,8-545 БТ (модель ТПЕ-216) ст.№1 (см. рисунок 4) предназначен для получения пара высокого давления при работе в составе энергоблока ст.№1 с турбоустановкой Т-204/220-12,8-2. Котёл спроектирован для сжигания Ирша-Бородинского бурого угля в качестве основного топлива, в качестве резервного предусмотрен Березовский бурый уголь. Растопочным топливом является мазут марки М-100. Основные характеристики котла представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики ТПЕ-216

Характеристика, ед. изм	Значение
Номинальная паропроизводительность, т/ч	670
Температура пара на выходе из котла, °С	545
Давление пара на выходе из котла, МПа	13,8
Расход пара промежуточного перегрева, т/ч	577
Температура пара промежуточного перегрева:	
– на входе в котел, °С	335
– на выходе из котла, °С	545
Давление пара промежуточного перегрева:	
– на входе в котел, кгс/см ²	27,3
– на выходе из котла, кгс/см ²	24,8

Продолжение таблицы 1

Характеристика, ед. изм	Значение
Температура питательной воды, °С	238
КПД котла (брутто), %	92,45

В топке размещены испарительные экраны и панели радиационного пароперегревателя высокого давления (РПП). В верхней части топочной камеры, в выходном окне, расположены два ряда ширм пароперегревателя высокого давления (ШПП).

В переходном газоходе последовательно по ходу газов расположены выходная III ступень пароперегревателя низкого давления (ПП НД III), конвективный пароперегреватель высокого давления (КПП ВД) и II ступень пароперегревателя низкого давления (ПП НД II). Ограждающие панели переходного газохода и конвективной шахты образуют входную ступень пароперегревателя высокого давления.

В опускной конвективной шахте по ходу газов расположены: регулировочная I ступень пароперегревателя низкого давления и водяной экономайзер.

Ниже расположен трубчатый воздухоподогреватель (ТВП) и далее, последней поверхностью по ходу газов, водяной экономайзер низкого давления (ВЭ НД) автономного типа (воспринятое в нём тепло используется для подогрева сетевой воды). ТВП и ВЭ НД установлены двумя отдельными колонками у боковых стен конвективной шахты.

Котёл оснащён системой очистки поверхностей нагрева и установкой механизированного шлакоудаления.

Системы пылеприготовления индивидуальные с прямым вдуванием и газовой сушкой.

В состав котельной установки дополнительно к котлу входит следующее вспомогательное оборудование:

1. Тягодутьевая установка в составе:
 - дымососов типа ДОД-28,5- 2 шт., со станцией жидкой смазки;
 - дутьевых вентиляторов типа ВДН-28К - 2 шт.;
 - воздухопроводов и газоходов в пределах котельного отделения.
2. Установка пылеприготовления в составе:
 - шести индивидуальных пылесистем с:
 - мельницами-вентиляторами МВ-2700/650/590;
 - питателями сырого угля ПС-40-1100;
 - двух станций жидкой смазки мельниц-вентиляторов;
 - двух дымососов рециркуляции газов ВВР-22;
 - газозаборных шахт, пылепроводов, газопроводов присадки газов.

3. Золоулавливающая установка в составе двух электрофильтров ЭСГ-1х4-31х40х75х150х5.
4. Система золошлакоудаления.
5. Трубопроводы пара и питательной воды, мазута, технической и осветлённой воды.
6. Средства технологических измерений (датчики).



Рисунок 4 – Продольный и поперечный разрез котла ТПЕ-216

1.3 Обоснование технических решений реконструкции

Рассматриваемые варианты реконструкции представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Варианты реконструкции

Решение	Преимущества	Недостатки
Уменьшение площади КПП НД-1	Простота монтажа	Может привести к изменению тепловосприятия последующих поверхностей
Увеличение расхода пара через КПП НД-1	Уменьшение температуры пара после КПП НД-1 без затрат	Невозможность увлечения расхода выше определенного значения из-за проходного сечения трубы
Увеличение доли газов рециркуляции	Небольшой объем мероприятий по реконструкции	Увеличение затрат на собственные нужды за счет работы дымососа рециркуляции
Изменение схемы включения группы КПП НД	Большие затраты на перекомпоновку трубопроводов	Может привести к изменению тепловосприятия последующих поверхностей
Замена верхней петли КПП НД-1 на более жаропрочную сталь	Возможность существенно не менять остальную часть схемы	Большие затраты на металл
Уменьшение площади КПП НД-3	Простота монтажа	Может привести к изменению тепловосприятия последующих поверхностей
Уменьшение площади КПП НД-2	Простота монтажа	Может привести к изменению тепловосприятия последующих поверхностей

Каждое решение затрагивает только один аспект проблемы, не решая проблему полностью. Окончательными вариантами реконструкции будут считаться комбинации различных решений, которые нужно определить исходя из расчета множества вариантов тепловой схемы. Поэтому определение вариантов, отвечающих на поставленную задачу дипломного проекта, будет основано на использовании специализированного ПО и анализе чувствительности для выходных параметров котла (см. раздел 3.1).

1.4 Цели и задачи

Цель: устранить проблему перегрева КПП НД-1, создать условия работы с минимизацией риска возникновения аварийных ситуаций, повысить экономичность существующего оборудования.

На рисунке 5 представлена заводская схема включения КПП НД-1.

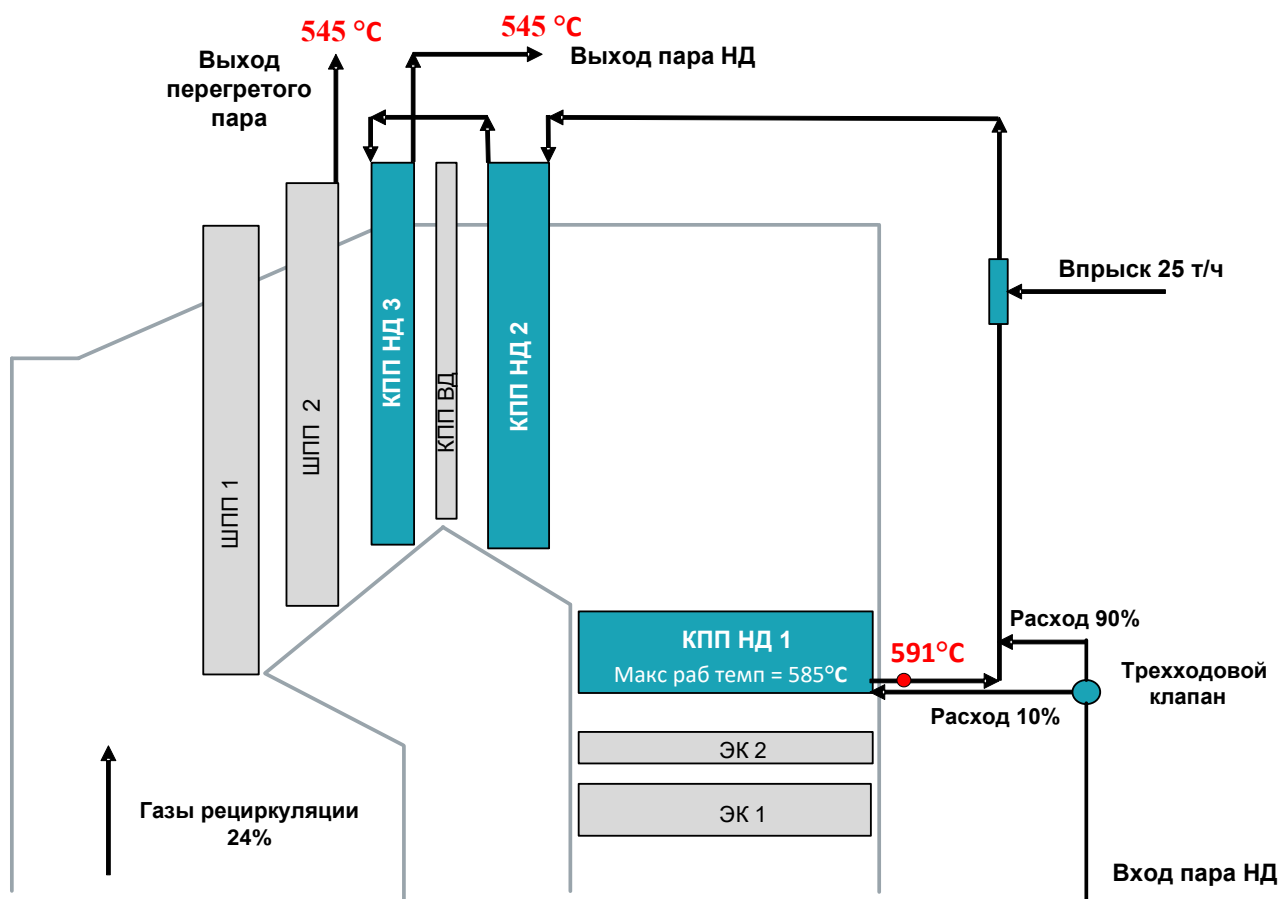


Рисунок 5 – Схема включения КПП НД-1

Задачи: разработка плана реконструкции К/А, что включает в себя:

- разработку мероприятий по снижению температуры пара после регулировочной ступени КПП и как следствие температуры стенки;
- рассмотрение влияния различных вариантов на режимные параметры и параметры на выходе из котла;
- выбор оптимального варианта;
- расчет срока окупаемости оптимального варианта;
- создание 3-D модели котельной установки, дающей наглядное представление о проведенной реконструкции.

1.5 Программное обеспечение для расчета котельного агрегата

Расчет котельной установки — это сложный и комплексный процесс, который требует большого количества времени и специальных знаний. Он включает в себя множество факторов, таких как тип котла, топливо, конструктивные и режимные характеристики и другие параметры, которые необходимо учитывать при расчете оптимальных параметров работы котла. Ручной расчет котельной установки может занимать значительное количество времени, особенно при сложных расчетах с большим количеством параметров и

ограничений. Однако, с помощью специализированного программного обеспечения, этот процесс можно автоматизировать, что позволяет ускорить расчеты и уменьшить вероятность ошибок.

Программное обеспечение для расчета котельной установки позволяет решать несколько задач:

- Удобство использования: автоматизированный расчет котлов позволяет упростить процесс проектирования и расчета котлов, что делает его более удобным и понятным для инженеров и проектировщиков.
- Автоматизация расчета котельной установки позволяет проводить анализ различных вариантов проектирования, учитывая ограничения и требования заказчика. Это позволяет оптимизировать котельную установку, уменьшить затраты на материалы и снизить потребление энергии.
- Автоматизированный расчет котельной установки упрощает процесс подготовки технической документации и позволяет быстро вносить изменения в проект при необходимости.
- Построение графиков и диаграмм для визуализации результатов расчетов.
- Генерация текстовых отчетов о результатах расчета.
- Интеграция с другими программными продуктами и системами.

Таким образом, автоматизация расчета котельной установки является актуальной и перспективной задачей, которая позволяет сократить время и уменьшить затраты на проектирование, увеличить точность результатов, выбрать наиболее оптимальные параметры работы котельной установки, а также оценить эффективность ее работы.

2 Описание программного продукта

2.1 Обзор существующего программного обеспечения

В настоящий момент на российском рынке существует 2 программы претендующих на предоставление комплексного подхода в расчете энергетических котлов – «ТРАКТ» и «Boiler Designer».

Программа «ТРАКТ» (см. рисунок 6) предназначена для проведения теплогидравлического расчета прямоточных и барабанных котлоагрегатов, написана на алгоритмическом языке «FORTRAN-77» и выполняется в операционной системе MS-DOS 3.30 и старше. Формально язык «FORTRAN-77» является устаревшим, как и операционная система MS-DOS, поэтому для запуска программы «ТРАКТ» требуются эмуляторы. Необходимость установки эмулятора, отсутствие редактора (заполнение трактов происходит путем

указания в таблице сопряженных элементов) не позволяют «ТРАКТУ» конкурировать с «Boiler Designer».

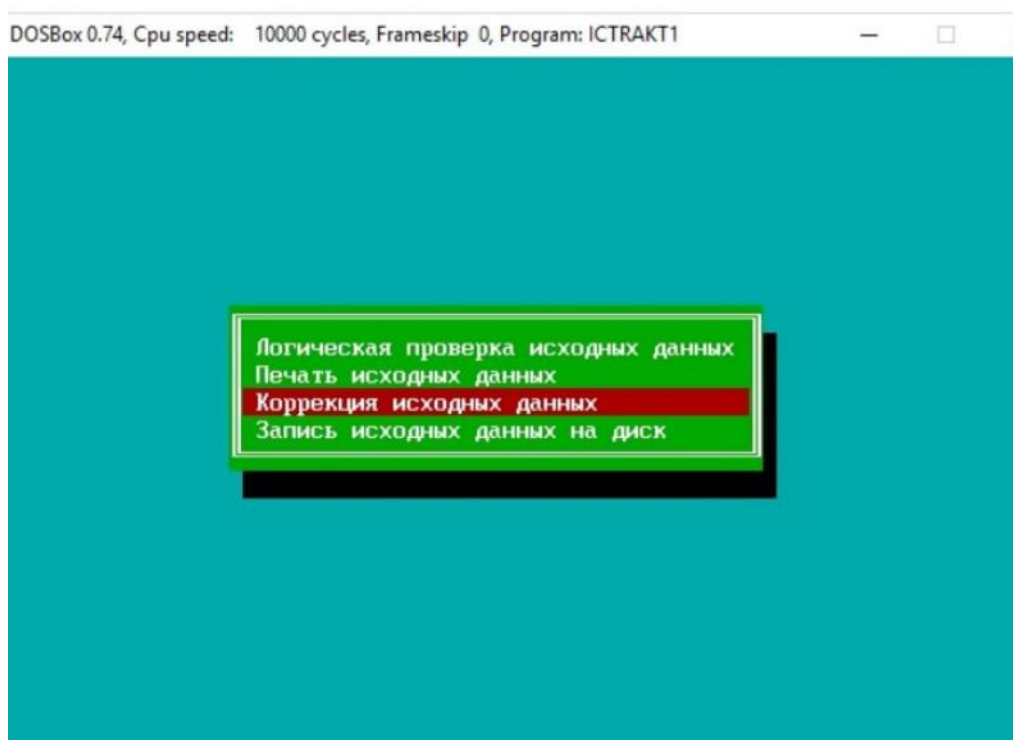


Рисунок 6 – Интерфейс программы «ТРАКТ»

Программа «Boiler Designer» (см. рисунок 7) позволяет выполнить следующие типы расчетов:

- Поверочные тепловой, гидравлический и аэродинамический расчеты котла;
- Расчет переходных режимов котла (пусков, остановов, резких изменений нагрузки и пр.);
- Расчет расхода топлива;
- Расчет естественной циркуляции;
- Расчет тепловых схем энергоблоков;
- Тепломеханический расчет поверхностей с учетом теплогидравлических разверок;
- Расчет максимальной пропускной способности трубопроводов сброса, продувки и т.п.

Отличительная особенность этой программы — это иерархическая структура функциональных групп. Так, например схема энергоблока содержит в себе пароводяной тракт, пароводяной тракт барабан, барабан циркуляции, которая в свою очередь содержит циркуляционный контур. Это имеет как свои плюсы, так и минусы. К плюсам относится удобство обращения к функциональной группе на уровне элемента, так, например по клику на топку

можно обратиться к группе экранов. Также в программе на выбор предоставляются 7 методик расчёта. К минусам можно отнести перегруженное представление группы трактов, так, например на схеме энергоблока предоставляется выбрать только один тракт для редактирования, и только потом перейти к другому. Такой подход делает представление не очень наглядным и при сборке и редактировании схемы заставляет пользователя дублировать элементы в трактах. Еще одним минусом является отсутствие конструкторского расчета.

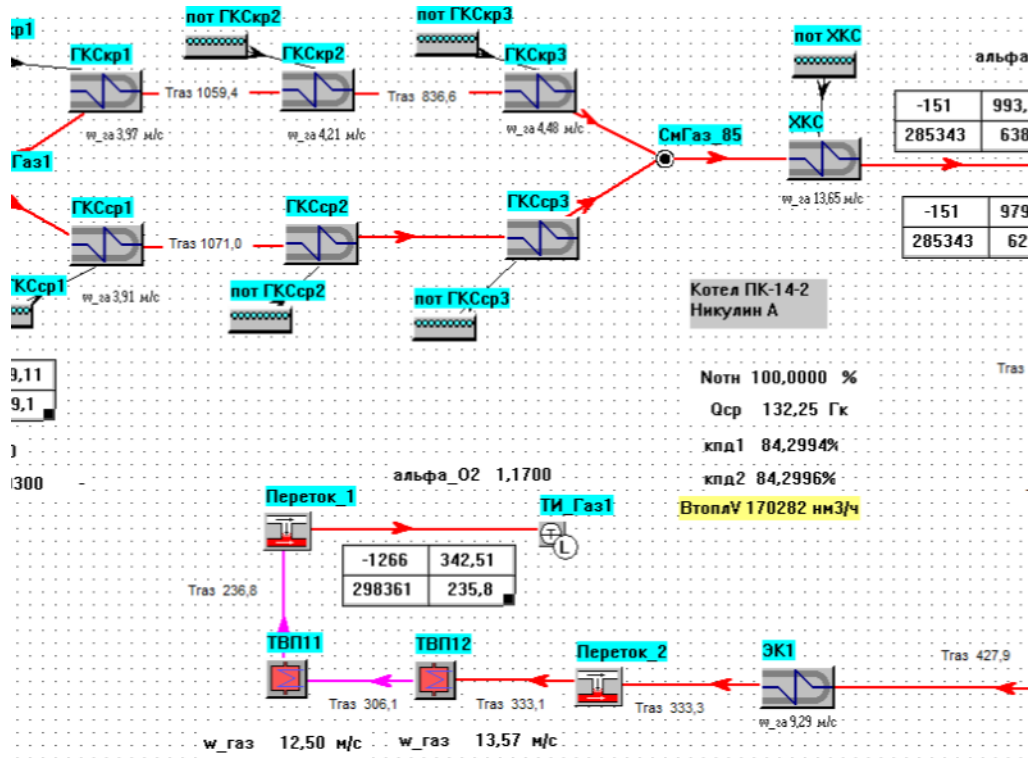


Рисунок 7 – Интерфейс программы «Boiler Designer»

Проанализировав выше представленные программы, можно прийти к выводу что в существующем ПО в полной мере не реализован комплексный подход к расчету. Расчет теплообмена в топке правильно выполнять вместе с расчетом системы пылеприготовления в силу замкнутости газового и воздушного тракта, а также газов рециркуляции. Тепловой и аэродинамический расчет выполнять вместе с расчетом выбросов. А по завершении расчета производить экономическую оценку.

Важно отметить, что комплексный автоматизированный расчет котельной установки может помочь в оценке экологической эффективности котельного оборудования. В этом случае используются методы экологической оценки, которые учитывают воздействие котла на окружающую среду, такие как выбросы в атмосферу, выбросы воды и т.д. Рациональное использование топливных ресурсов и сокращение выбросов в атмосферу способствуют

уменьшению негативного воздействия на окружающую среду и улучшению экологической обстановки в целом.

Эти отсутствующие аспекты в расчете котельной установки заставляют по-новому посмотреть на представление о ПО и сформулировать к нему актуальные требования:

- Формирование максимально полной элементной базы котла (в т. ч. элементов пылесистем, тягодутьевых машин, различной арматуры и т.д.)
- Создание графического редактора, дающего наиболее полное представление о взаимодействии трактов и исключающего дублирование элементов;
- Создание гибкой расчетной методики, позволяющей находить максимально полную номенклатуру неизвестных;
- Проведение расчета, опираясь на комплексный подход, учитывающий расчет пылесистем, аэродинамику, гидравлический расчет и т.д.;
- Универсальность подхода;
- Масштабируемость.

2.2 Описание нового ПО

2.2.1 Общие сведения

Новое программное обеспечение на данном этапе позволяет выполнить:

- поверочный, конструкторский или гибридный тепловой расчет котельного агрегата;
- сформировать отчет с полученными данными;
- построить график распределения температур по трактам.

Базовая программа реализована на платформе .NET Framework с использованием WinForms для создания графического интерфейса и языка программирования C# для реализации бизнес-логики. В этой программе реализован основной расчетный модуль, содержатся все классы и библиотеки необходимые для расчета («WaterSteamLibrary», «MathNet.Numerics», API «Microsoft.Office.Interop.Visio»).

Дополнительно для функционирования программы необходимо иметь установленный пакет Microsoft Office включая Visio 13-ой версии или выше. Редактор схем и программа по диагностике реализованы с использованием языка VBA в Visio-файле с поддержкой-макросов (.vsdm). После редактирования схемы данный файл экспортируется в базовую программу на расчет.

2.2.2 Описание логической структуры

В качестве редактора схем и программы по диагностике выбран векторный графический редактор Microsoft Visio.

Microsoft Visio предоставляет широкий набор возможностей в качестве редактора диаграмм и графических изображений. Фигуры в Visio представляют основные элементы, которые составляют диаграммы. Каждая фигура имеет свои свойства, которые можно настроить для достижения нужного визуального и функционального эффекта.

Вот некоторые необходимые в расчете возможности, которые предоставляет Visio:

- Множество графических элементов: Visio предлагает обширную библиотеку графических элементов и символов, которые могут быть использованы в диаграммах. Вы можете выбирать и размещать элементы, такие как блоки, стрелки, формы, коннекторы, фигуры и многое другое, чтобы создать наглядные и информативные диаграммы;

- Макросы и пользовательские действия: с помощью программирования и макросов можно сделать расчет прямо в Visio оперируя данными из shapessheet листа;

- Пользовательские свойства: использование свойств фигур в Visio позволяет ассоциировать данные с элементами схемы и передавать их для последующего расчета или обработки.

Основной базой для расчета сборки схем является трафарет (библиотека) с элементами котла (см. рисунок 8). Трафарет является отдельным файлом с форматом (.vssx), который подгружается в файл Visio с поддержкой-макросов (.vsdm). Для сборки котельного агрегата ТПЕ-216 была написана библиотека из 30-ти элементов, где для каждого элемента был расписан набор свойств в Shape Data (разделе таблицы фигур, содержащим данные для фигуры, см. рисунок 9). В Shape Data определяется как скрытые, так и отображаемые параметры. Некоторые из ячеек в Shape Data имеют формулы взаимосвязанные с кодом на VBA.

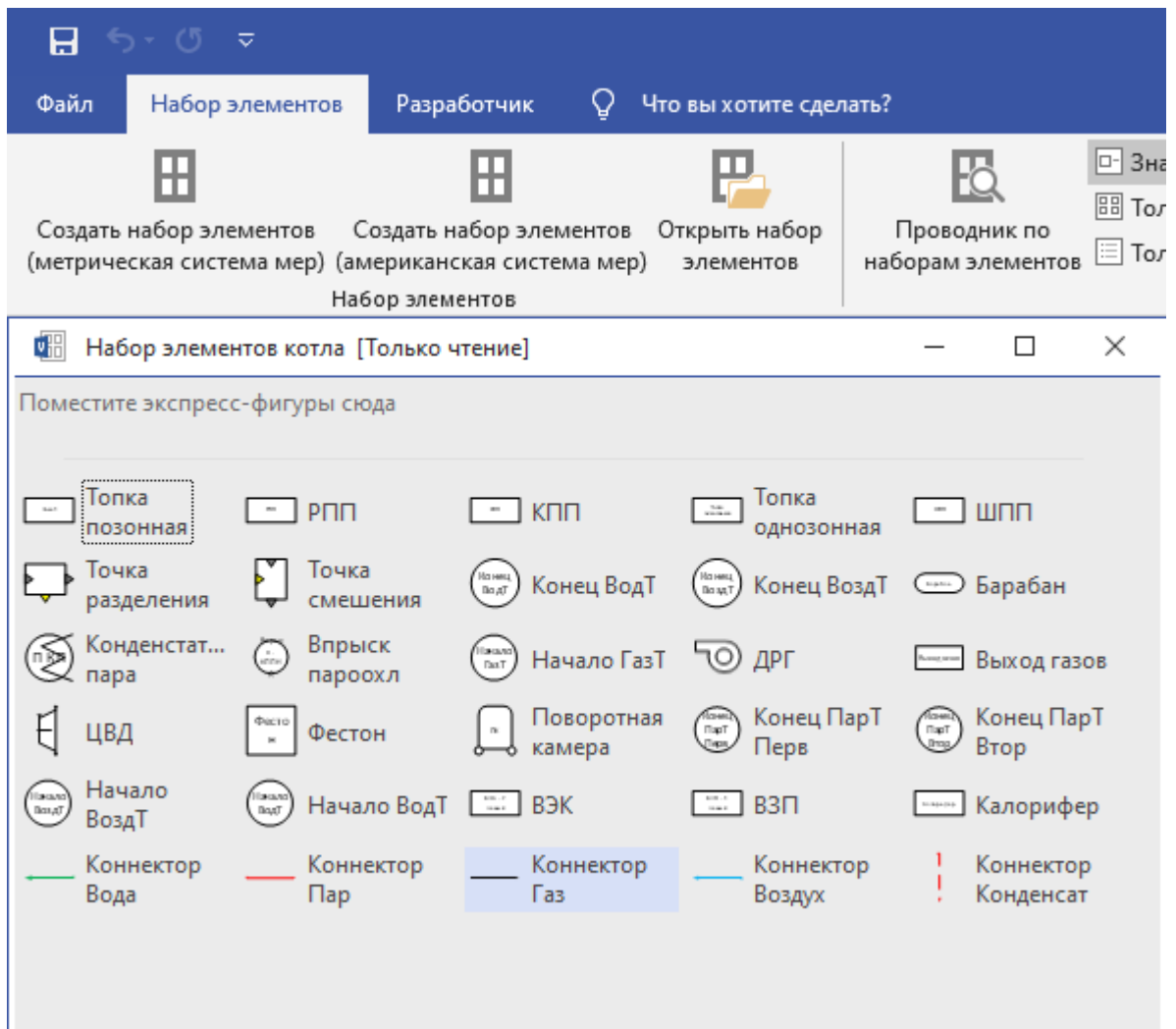


Рисунок 8 – Трафарет с элементами котла

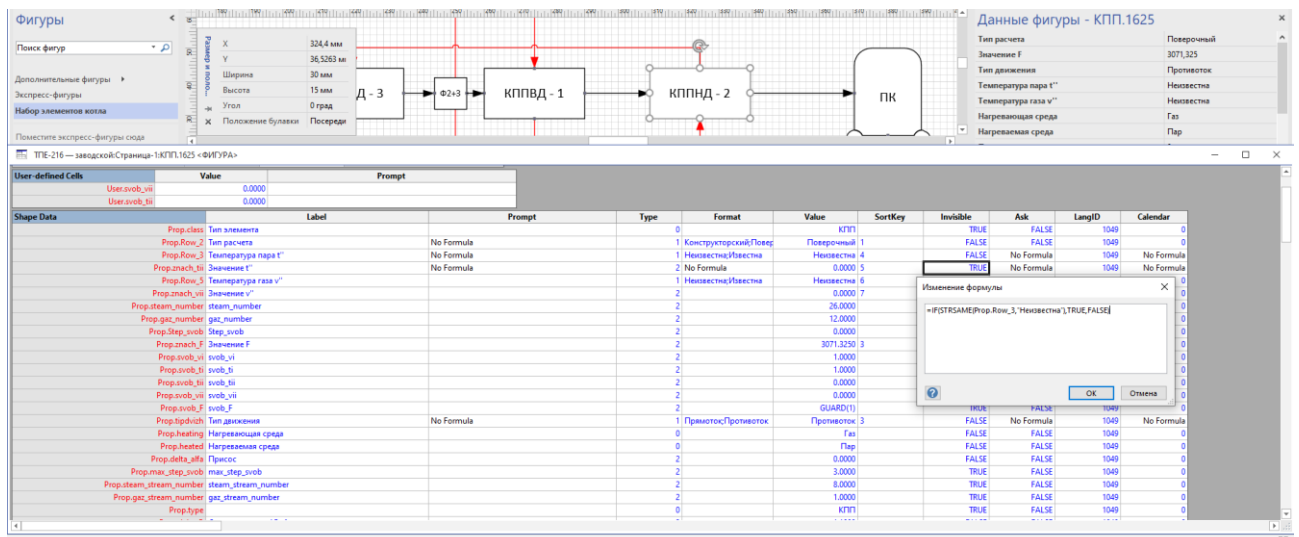


Рисунок 9 – Shape Data фигуры

Все необходимые фигуры расставляются на рабочем поле документа и соединяются между собой коннекторами, обеспечивая логическую связь между элементами. После заполнения элементов данными необходимо сделать

диагностику схемы, для этого на рабочем листе есть кнопка, являющаяся ActiveX компонентом, которая запускает макрос.

Макрос написан на языке VBA и выполняет расстановку индексов по относительному расположению элемента в тракте, а также расставляет индексы для переменных (для известных 1, для неизвестных 0).

Каждый тракт имеют свою точку начала в виде элемента «Начало» для газового, водяного и воздушного или «Барабан» для парового тракта. У данных элементов по умолчанию номер в соответствующем тракте равен 0. Программа на VBA расставляет у остальных элементов на схеме их порядковый номер относительно элементов с индексом 0.

Также поскольку расчет подразумевает нахождение любой совокупности неизвестных, то на основе типа расчета и выбранных известных температур, расставляются индексы для известных и неизвестных переменных (см. раздел 2.2.5).

Логика заключается в следующем: цикл проходится по каждому коннектору на рабочем поле и передает коннектор в метод Indexing на расчет (см. рисунок 10). В методе коннектор рассматривается с позиции двух точек: BeginX и EndX и в каждом случае через свойство Connect.ToSheet получает фигуру к которому присоединен конец коннектора. Взаимодействуя с двумя точками коннектора, происходит получение индекса из сопряженной фигуры и производятся дальнейшие операция с ними (см. рисунок 11). Таким же образом происходит и расстановка индексов у известных и неизвестных переменных.

Код на скриншотах упрощен для более наглядной демонстрации.

```
For Each cnct In ActivePage.Connects
  If cnct.FromSheet.OneD Then
    ClassConnections.Indexing cnct, ind_g
    progress = i * 100 / j
    TextBox1.Text = "Выполнено: " & progress & "%"
    DoEvents
  End If
Next
```

Рисунок 10 – Код на VBA: цикл для коннекторов

```

Public Sub Indexing(ByVal cnct As Visio.Connect, ByRef ind_g() As Integer)
Dim shp_elem As shape
Dim agBegin As Double
Dim agEnd As Double
Dim i
Dim dostup As Integer
Dim name As String
Dim prop_name As String
Dim prop_name_begin As String
Dim prop_name_end As String
Dim prop_num_trakt As String
Dim prop_name_alter As String
Dim prop_num_stream As String
Dim prop_stream_number As String
'ПОЛУЧЕНИЕ НАЗВАНИЯ СВОЙСТВ КОНКРЕТНОГО ТРАКТА
If cnct.FromSheet.Cells("LineColor").ResultStr(0) = "RGB(0; 0; 0)" Then
    'GAZ
    name = """"gaz""""
    prop_name = "Prop.gaz_number"
    prop_name_begin = "Prop.gaz_number_begin"
    prop_name_end = "Prop.gaz_number_end"
    prop_num_trakt = "Prop.num_gaz"
    prop_name_alter = "Prop.gaz_number_alter"
    prop_num_stream = "Prop.num_stream_gaz"
    prop_stream_number = "Prop.gaz_stream_number"
ElseIf cnct.FromSheet.Cells("LineColor").ResultStr(0) = "RGB(255; 0; 0)" Then
    'STEAM
ElseIf cnct.FromSheet.Cells("LineColor").ResultStr(0) = "RGB(0; 176; 80)" Then
    'WATER
ElseIf cnct.FromSheet.Cells("LineColor").ResultStr(0) = "RGB(0; 176; 240)" Then
    'AIR
End If
If cnct.FromCell.name = "BeginX" Then
    'ПОЛУЧЕНИЕ ФИГУРЫ ПРИСОЕДИНЕННОЙ К НАЧАЛЬНОЙ ТОЧКЕ
    'ОТРАБОТКА МЕТОДОВ ДЛЯ РАССТОНОВКИ ИНДЕКСОВ
Else
    'ПОЛУЧЕНИЕ ФИГУРЫ ПРИСОЕДИНЕННОЙ К КОНЕЧНОЙ ТОЧКЕ
    'ОТРАБОТКА МЕТОДОВ ДЛЯ РАССТОНОВКИ ИНДЕКСОВ
End If
End Sub

```

Рисунок 11 – Код на VBA: метод Indexing

На рисунке 12 представлена блок-схема Visio-приложения.

После успешно проведенной диагностики файл необходимо сохранить и затем он будет готов к импорту.

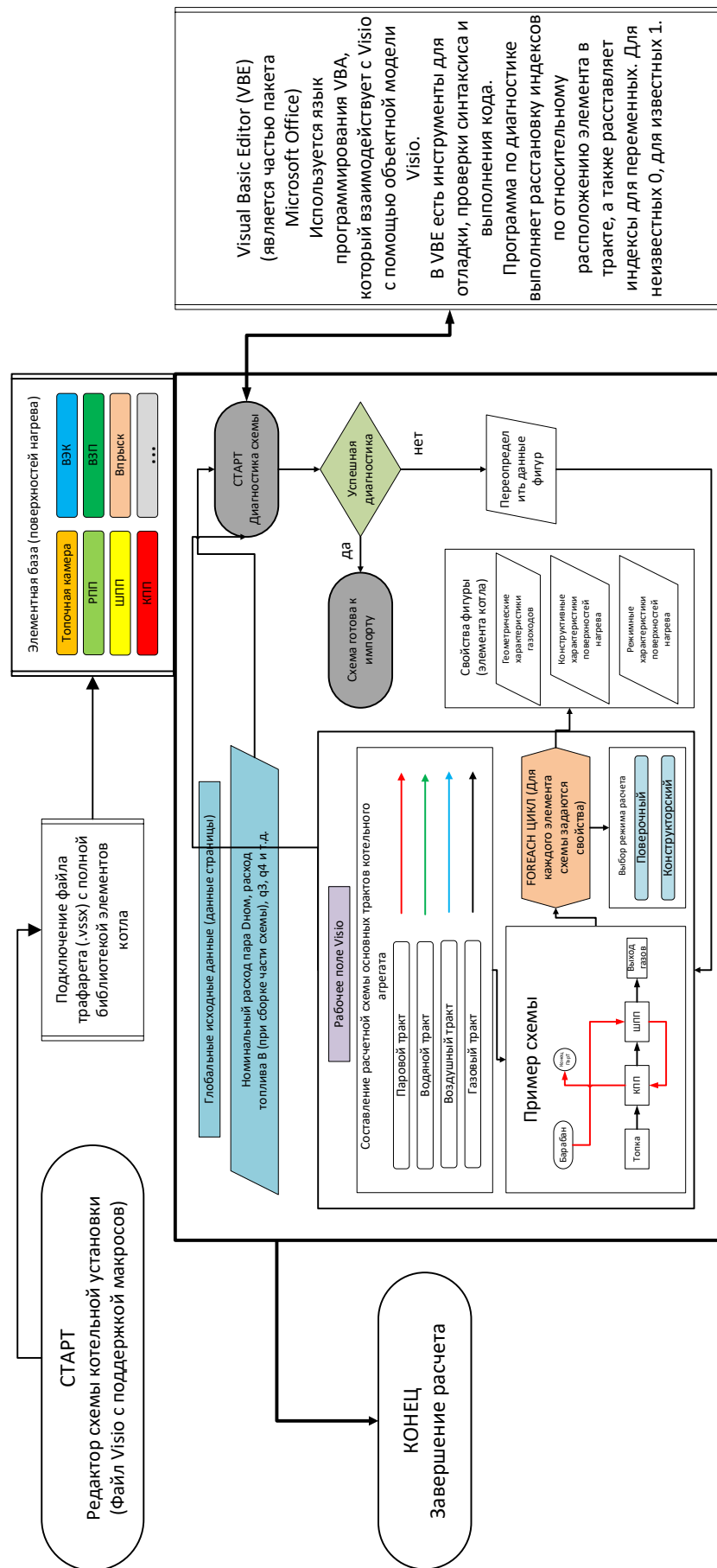


Рисунок 12 – Блок-схема Visio-приложения

В основе WinForms приложения лежит объектно-ориентированный подход (см. рисунок 13). Данная парадигма основана на представлении программы в виде совокупности взаимодействующих объектов, каждый из которых является экземпляром определённого класса, а классы образуют иерархию наследования. В данной программе класс является представлением какого-либо объекта тепловой схемы. Рассмотрим структуру класса на примере воздухоподогревателя (см. рисунок 14).

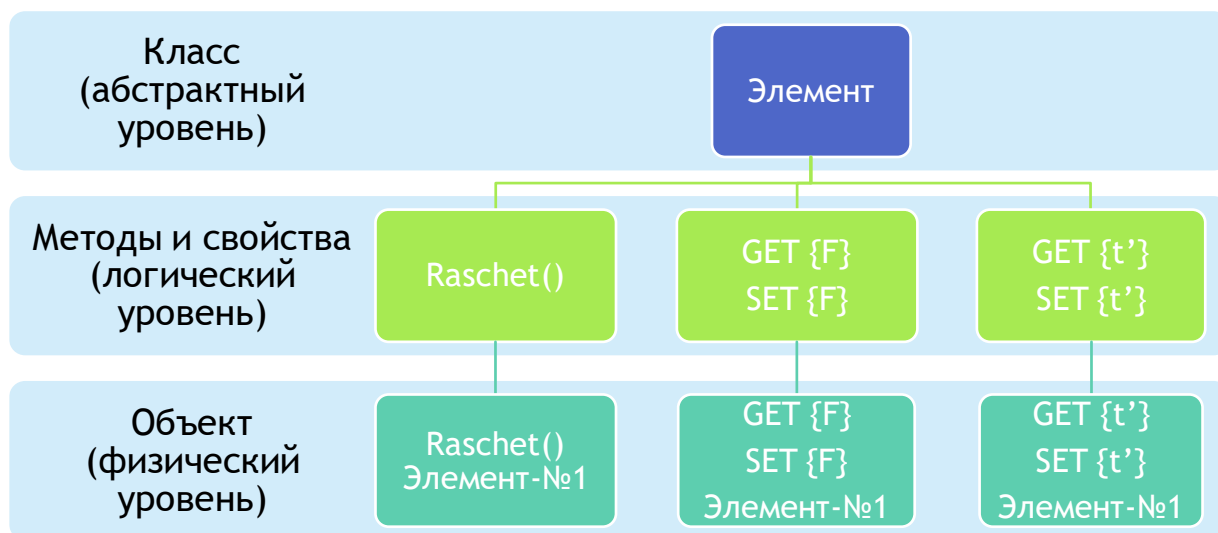


Рисунок 13 – Объектно-ориентированный подход

Соблюдая принцип инкапсуляции, все поля класса делаются приватными.

При создании класса наследуются интерфейсы. Интерфейс представляет собой ссылочный тип, который может определять некоторый функционал - набор методов и свойств без реализации. Затем этот функционал реализуют классы и структуры, которые применяют данные интерфейсы. Так как ВЗП это элемент, который взаимодействует с двумя трактами: газовым и воздушным, то класс ВЗП наследует соответствующие интерфейсы.

В конструктор класса передаются данные для создания экземпляра и определяется логика, которая отработает при создании.

Свойства позволяют обратиться к полям класса и поменять или получить значение в зависимости от метода доступа.

Методы реализуют саму логику. Они содержат набор инструкций, которые выполняют определенные действия. Главная функция которая есть у всех классов это «`poisk_korney()`».

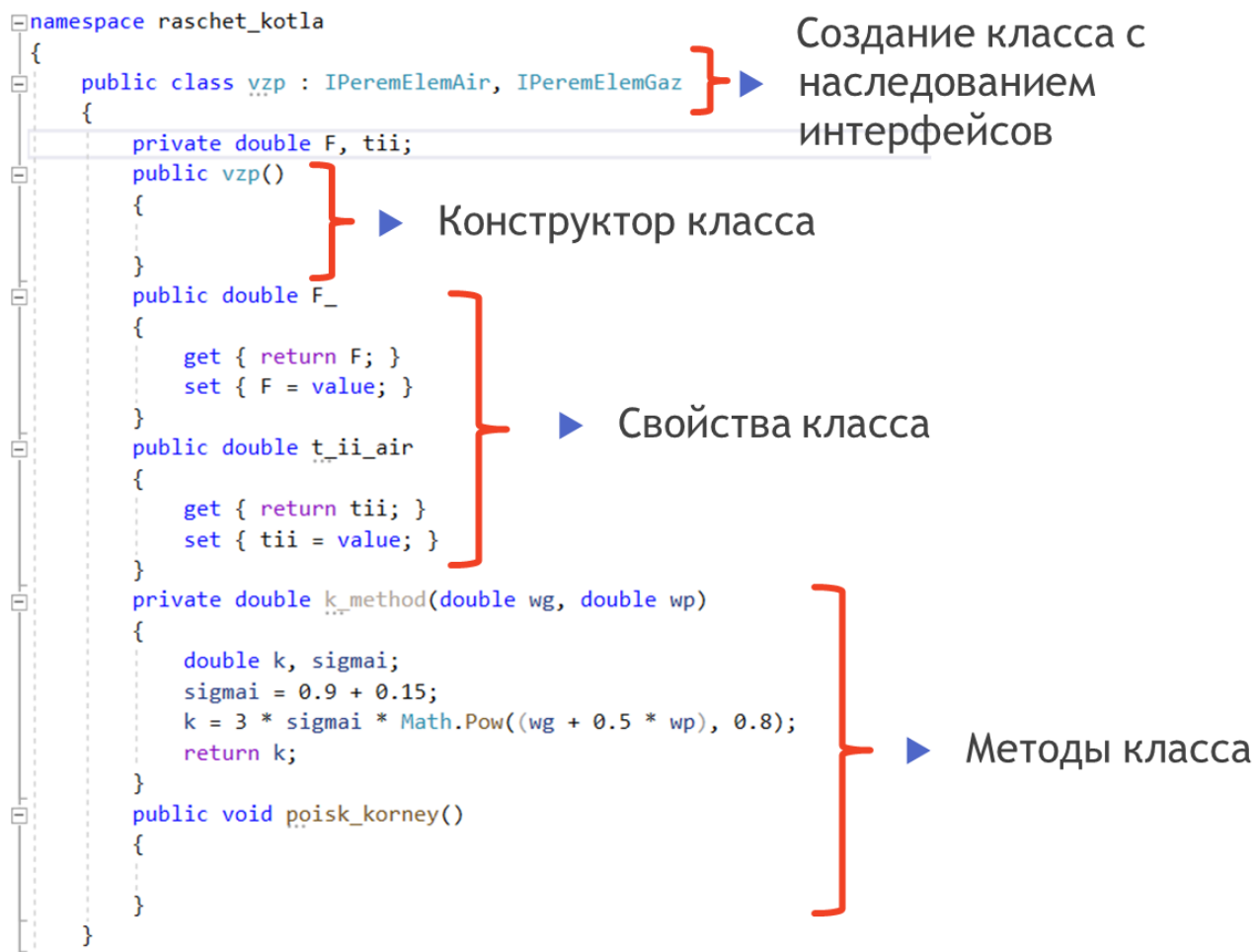


Рисунок 14 – Пример структуры класса

Некоторые элементы такие как конвективный пароперегреватель и водяной экономайзер, имеют одинаковые балансовые уравнения и в целом имеют пересекающийся набор свойств и полей. Чтобы исключить дублирование, т.е. не определять одинаковые свойства и методы в 2-ух разных классах, целесообразно воспользоваться возможностями ООП, а в частности наследованием и полиморфизмом.

Определим базовую логику, которая есть и в КПП, и в ВЭК в абстрактном классе конвективная поверхность «AbstractConvPov». Абстрактный класс в целом имеет такой же функционал, как и обычный. Он также может иметь переменные, методы, конструкторы, свойства. Главное отличие абстрактного класса от обычного, что мы не можем использовать конструктор абстрактного класса для создания экземпляра класса. Таким образом абстрактный класс предоставляет некий контракт или план, который мы можем переопределить в классе наследнике, воспользовавшись полиморфизмом. Для этого нужные методы абстрактного класса помечаются ключевым словом «virtual», а в классе наследнике словом «override» и переопределяются (см. рисунок 15).

Метод абстрактного класса

```
public virtual void poisk_korney()
{
    if (double.IsNaN(Br))
    {
        Br = 20;
    }
    this.vc_rec = kotel.vc_rec_;
    this.Vg = kotel.Vg(alfai + delta_alfa / 2, kotel.Vg_rec_);
    this.fi = kotel.fi_;
    this.Hhv0 = kotel.Hhv0_;
    this.H_rec = kotel.H_rec_;
    solution();
    Qb_method();
}
```

Методы КПП и ВЭК

```
public override void poisk_korney()
{
    base.poisk_korney();
}

public override void poisk_korney()
{
    base.poisk_korney();
}
```



Рисунок 15 – Полиморфизм методов

На рисунке 16 видно, что абстрактный класс наследует интерфейс по газовому тракту, класс КПП наследует «AbstractConvPov» и интерфейс по паровому тракту, класс ВЭК наследует «AbstractConvPov» и интерфейс по водяному тракту. Т.к. класс наследник наследует и все родительские наследования, то интерфейс «IPeremElemGaz» наследовать не нужно.

```
abstract class AbstractConvPov : IPeremElemGaz

class kpp : AbstractConvPov, IPeremElemPar
class vek : AbstractConvPov, IPeremElemVoda
```

Рисунок 16 – Наследование классов

Перед началом расчета импортируется файл-Visio с собранной схемой и из combo-box элемента выбирается вид топлива. На основе схемы, создается массив списков (List<T>[]) для каждого тракта, который заполняется объектами, созданными на основе класса исходя из типа элемента на схеме. Создание объектов происходит в цикле при обращении к методу создания соответствующего элемента на схеме. В методе с помощью API Microsoft.Office.Interop.Visio извлекаются все необходимые данные из фигуры (shape) Visio и заполняется конструктор.

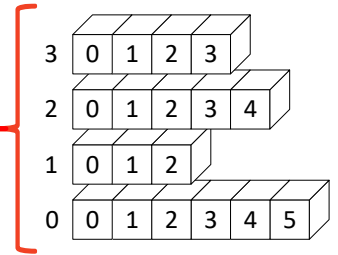
Массив списков в данном случае нужен для хранения элементов подпотоков тракта. Поскольку в схеме есть точки разделения и точки смешения, то тракт разбивается на несколько подпотоков, где элементы после точки разделения имеют одинаковый порядковый номер. На рисунке 17 представлена схема, демонстрирующая организацию списков.

```

List<IPeremElemPar>[4] elemPar;
List<IPeremElemVoda>[] elemWater;
List<IPeremElemAir>[] elemAir;
List<IPeremElemGaz>[] elemGaz;

```

Зубчатый массив



Зубчатый массив
Int[4][]

Рисунок 17 – Организация списков элементов

Далее списки сортируются по индексам, хранящимся в объектах. После начинается цикл проходящий каждый элемент всех подсписков каждого тракта, обращаясь при этом к свойствам элемента и к функции расчета (см. рисунок 18). При каждом обращении к новому объекту происходит передача данных из сопряженного элемента. В зависимости от заданных неизвестных для конкретной поверхности, данные могут передаваться как из предыдущей поверхности, так и из последующей. Так например, если у поверхности нагрева в качестве неизвестных заданы температура пара t' и газа v' на входе, то полученные значения из сопряженного элемента будут температура пара t'' и газа v'' на выходе.

```

for (int i = 0; i < elem_trakt.Count; i++)
{
    string[] varia = elem_trakt[i].varia_;
    for (int j = 0; j < varia.Length; j++)
    {
        switch (varia[j])
        {
            case "hi_air":
                elem_trakt[i].t_i_air = i != 0 ? elem_trakt[i - 1].t_ii_air : elem_trakt[i].t_i_air;
                elem_trakt[i].h_i_air = i != 0 ? elem_trakt[i - 1].h_ii_air : elem_trakt[i].h_i_air;
                break;
            case "hii_air":
                elem_trakt[i].t_ii_air = i != elem_trakt.Count - 1 ? elem_trakt[i + 1].t_i_air : elem_trakt[i].t_ii_air;
                elem_trakt[i].h_ii_air = i != elem_trakt.Count - 1 ? elem_trakt[i + 1].h_i_air : elem_trakt[i].h_ii_air;
                break;
            default: continue;
        }
    }
    if (i != elem_trakt.Count - 1)
    {
        //elem_trakt[i].bettagv_ii = elem_trakt[i + 1].bettagv_i;
    }
    if (i != 0)
    {
        elem_trakt[i].bettagv_i = elem_trakt[i - 1].bettagv_ii;
        elem_trakt[i].Bi_air_ = elem_trakt[i - 1].Bii_air_;
    }
    elem_trakt[i].poisk_korney();
}

```

Получение значений из сопряженного элемента

Обращение к функции расчета

Рисунок 18 – Получение данных из сопряженного элемента и расчет на примере воздушного тракта

Цикл завершается если температура элемента в каждом тракте на текущей итерации отличается от температуры на предыдущей итерации меньше, чем на заданную погрешность $(t'' - t''_{i-1}) < \varepsilon$.

После расчета создается копия файла Visio и полностью очищаются данные для каждой фигуры (Shape Data). Для каждой фигуры создается новая Shape Data и заполняется новыми рассчитанными данными, обращаясь к свойствам соответствующего экземпляра класса (см. рисунок 19).

```
foreach (Visio.Shape shape in ap_output.ActivePage.Shapes)
{
    label17.Text = $"Очистка {shape.Name}";
    await Task.Delay(1);
    shape.DeleteSection((short)Visio.VisSectionIndices.visSectionProp);
    shape.DeleteSection((short)Visio.VisSectionIndices.visSectionUser);
    var foundElement = all_elem.FirstOrDefault(o => o.name_ == shape.Name);
    if (foundElement != null)
    {
        label17.Text = $"Формирование данных {shape.Name}";
        await Task.Delay(1);
        data(foundElement, shape);
    }
}
```

Рисунок 19 – Заполнение фигур новыми данными

Блок-схема WinForms приложения на C# (расчетной программы) представлена на рисунке 20.

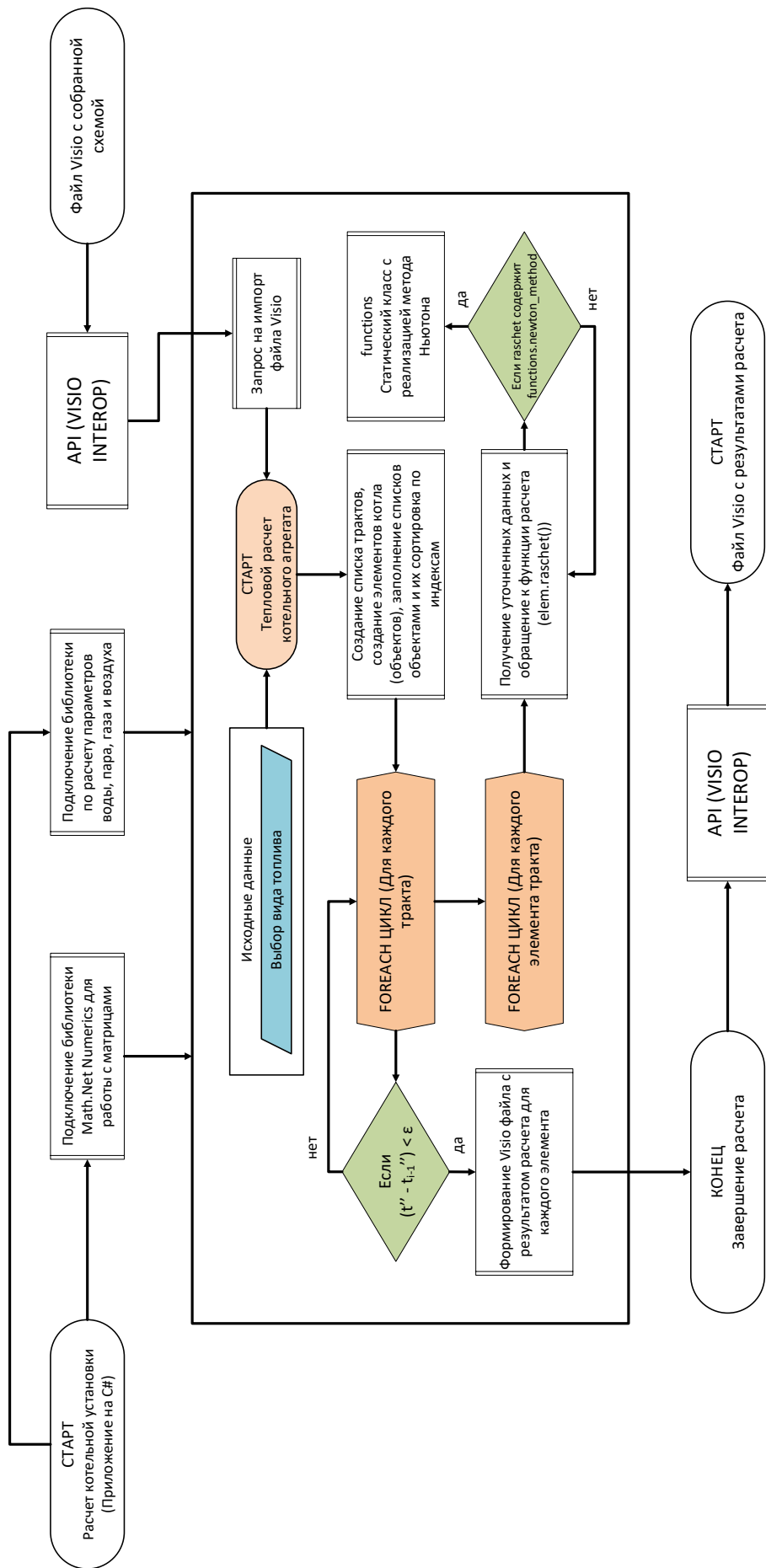


Рисунок 20 – Блок-схема расчетной программы

2.2.3 Описание математического подхода

Расчет схемы представляет собой обращение к каждому элементу составленных трактов и обращение к его функции расчета. Для расчета большинства элементов необходимо решить одно или несколько балансовых уравнений. В этом случае объект (элемент схемы) использует статический класс с реализацией метода Ньютона для системы нелинейных уравнений. Для решения уравнений составляется:

– вектор для неизвестных $X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$;

– матрица Якоби (матрица частных производных)

$$W(X_i) = \begin{pmatrix} \frac{df_1}{dx_1} & \dots & \frac{df_1}{dx_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{df_n}{dx_1} & \dots & \frac{df_n}{dx_n} \end{pmatrix};$$

– вектор для уравнений системы $F(X) = \begin{pmatrix} f_1(X) \\ \dots \\ f_n(X) \end{pmatrix} = 0$.

Итерационная процедура вычисления выглядит следующим образом:

$$X_{i+1} = X_i - W^{-1}(X_i) \cdot F(X_i) \quad (2.1)$$

и продолжается, пока не выполнено условие $|X_{i+1} - X_i| < \varepsilon$, где ε – указанная пользователем допустимая погрешность.

Данный математический подход позволяет найти любую совокупность неизвестных, что позволяет производить поверочный, конструкторский, гибридный расчеты, оценку степени загрязнения, шлакования поверхностей нагрева, поиск расходов.

Рассмотрим решение элемента схемы на примере конвективного пароперегревателя (см. рисунок 21). Балансовые уравнения для расчета КПП выглядят следующим образом:

$$\begin{cases} \varphi(H'_r - H''_r + \Delta\alpha_{\text{пп}} \cdot H_{\text{хв}}^0) = \frac{kF_{\text{кпп}} \Delta t}{B_p \cdot 10^3} \\ \frac{D_{\text{кпп}}}{B_p} (h'' - h') - Q_{\text{к}}^{\text{п}} = \frac{kF_{\text{кпп}} \Delta t}{B_p \cdot 10^3} \end{cases} \quad (2.2)$$

Выразим из уравнений энтальпии H'' и h'' :

$$\begin{cases} H''_{\Gamma} = H'_{\Gamma} + \Delta\alpha_{\text{пл}} \cdot H_{\text{хв}}^0 - \frac{kF_{\text{кпп}} \Delta t}{B_p \cdot 10^3 \cdot \varphi} \\ h'' = \left(\frac{kF_{\text{кпп}} \Delta t}{B_p \cdot 10^3} + Q_{\text{к}}^{\text{л}} \right) \cdot \frac{B_p}{D_{\text{кпп}}} + h' \end{cases} \quad (2.3)$$

Тогда зная, что энтальпия газа находится как функция при температуре газа и избытке воздуха, а энтальпия пара как функция при известном давлении и температуре, соответственно получим $H''_{\Gamma \text{ пров}} = H(v'', \alpha'')$, $h''_{\text{пров}} = h(p'', t'')$.

Принимая что вектор для уравнений системы $F(X) = 0$, приведем уравнения к этому виду:

$$\begin{cases} f_1(X) = H''_{\Gamma} - H''_{\Gamma \text{ пров}} \\ f_2(X) = h'' - h''_{\text{пров}} \end{cases} \quad (2.4)$$

Теперь задавшись неизвестными, можно решить эти уравнения методом Ньютона.

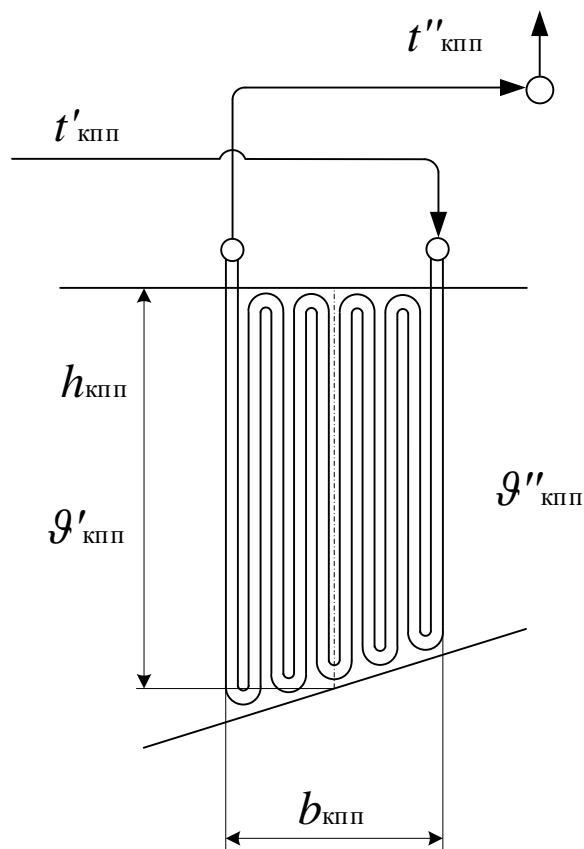


Рисунок 21 – Схема КПП

Рассмотрим реализацию данного метода на языке С# (см. рисунок 22).

Поскольку функция по расчету элемента может содержать больше одного уравнения, то метод Ньютона должен быть универсальным для любого числа неизвестных.

Первым параметром в функцию передается делегат, который служит указателем на конкретный метод для расчета. Данный метод может хранить в себе различную логику, которая не важна для данной итерационной процедуры.

Втором параметром передается массив строк, содержащий в себе названия неизвестных переменных.

Третьим параметром передается словарь, содержащий в себе все переменные, которые могут быть в качестве неизвестных.

```
public static void newton_metod(tipPP tipPP, string[] unknown, ref Dictionary<string, double> argum)
{
    Vector<double> X = DenseVector.Create(unknown.Length, 0);
    Vector<double> Y = DenseVector.Create(unknown.Length, 0);
    Vector<double> xlast;
    Matrix<double> W = DenseMatrix.Create(X.Count, X.Count, 0);
    Vector<double> dX;
    double Dx = double.MaxValue;
    int iter = 0;
    do
    {
        iter++;
        Y = f(tipPP, argum);
        for (int i = 0; i < unknown.Length; i++)
        {
            X[i] = argum[unknown[i]];
        }
        W = df(tipPP, argum, unknown);
        xlast = X;
        X -= W.Inverse().Transpose() * Y;
        for (int i = 0; i < unknown.Length; i++)
        {
            argum[unknown[i]] = X[i];
        }
        dX = X - xlast;
        Dx = dX.SumMagnitudes();
        if (iter > 1000)
        {
            return;
        }
    } while (Dx > eps);
}
```

Рисунок 22 – Метод Ньютона на С#

Словарь представляет собой ссылочный тип данных, хранящий объекты, которые представляют пару ключ-значение. Класс словаря Dictionary<K, V> типизируется двумя типами: параметр K представляет тип ключей, а параметр V предоставляет тип значений.

В данном случае словарь в качестве ключа содержит строковое название переменной, а в качестве значения численное значение с плавающей запятой.

Обращаясь по ключу, в качестве которого мы передаем элемент из строкового массива, мы получаем численное значение неизвестной переменной.

Далее с помощью библиотеки `MathNet.Numerics` создаются вектор X для неизвестных, вектор Y для уравнений системы и матрица Якоби W размерностью равной числу неизвестных. Следующим шагом начинается цикл, в котором, обращаясь к соответствующим функциям, заполняются вектор Y и матрица W и рассчитывается вектор неизвестных X . Из вектора X данные перезаписываются в словарь `argum` для расчета в функции предоставленной делегатом. Далее находится разница dX на текущей и предыдущей итерации и рассчитывается значение абсолютной погрешности Dx . Если Dx оказывается меньше заданной погрешности `eps`, то цикл завершается.

На рисунке 23 представлена блок-схема метода Ньютона.

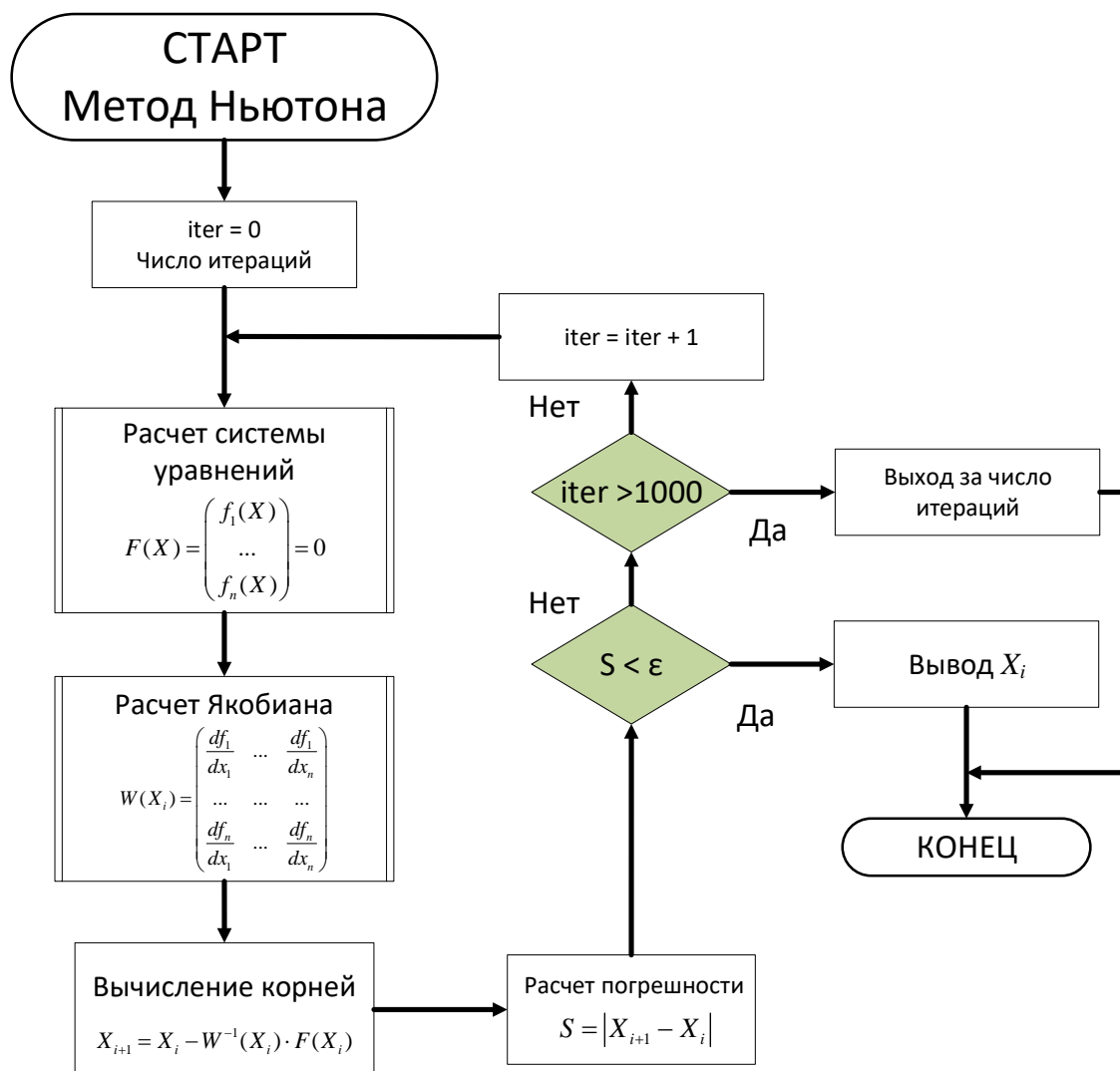


Рисунок 23 – Блок-схема метода Ньютона

2.2.4 Вызов и загрузка

Для начала работы с редактором необходимо иметь сам Visio-файл формата (.vsdm) и трафарет с элементами формата (.vssx). После запуска Visio-файла необходимо подтвердить запуск макросов (см. рисунок 24). Далее к файлу необходимо подключить трафарет (см. рисунок 25). Для этого в поле фигуры необходимо перейти во вкладку «Дополнительные фигуры» и нажать на «Открыть набор элементов», далее указать путь к трафарету.

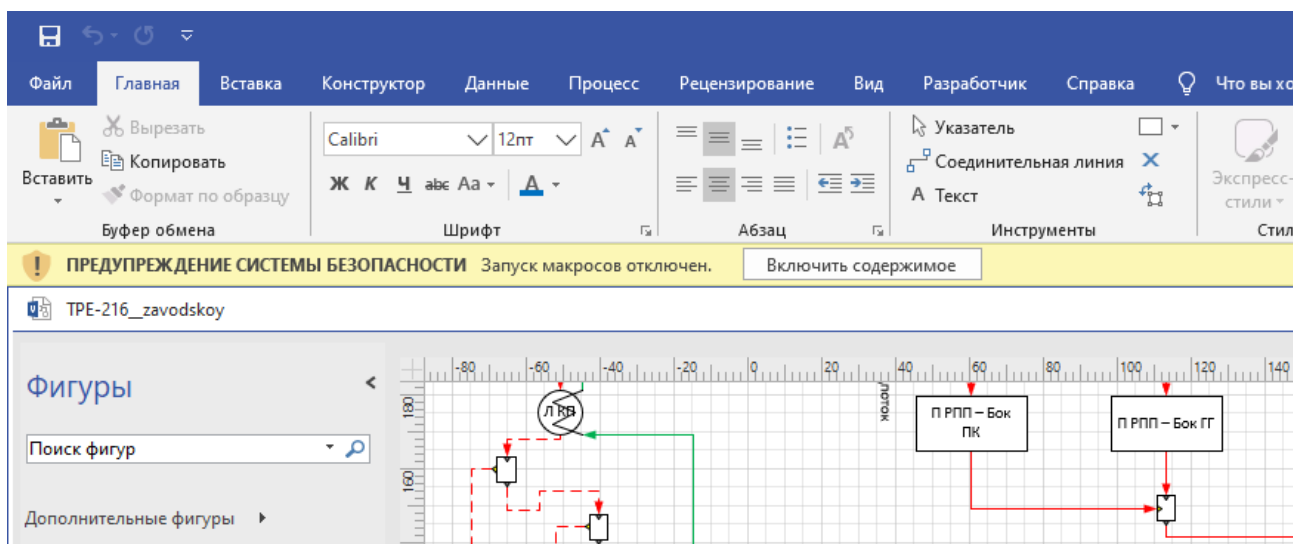


Рисунок 24 – Включение макросов

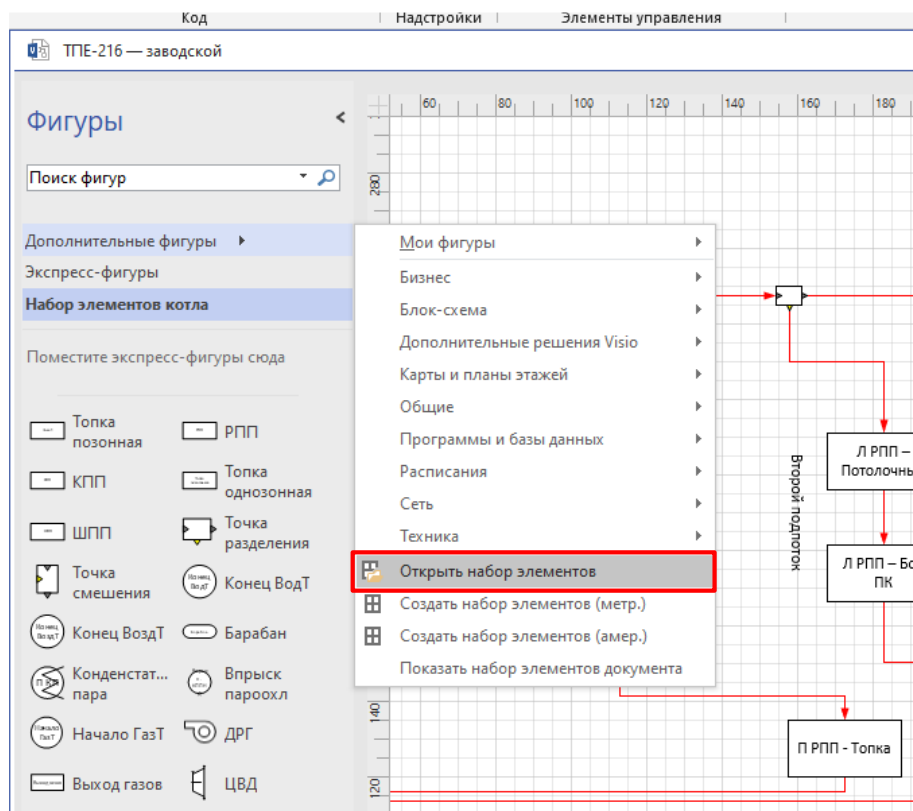


Рисунок 25 – Подключение трафарета

После проделанных шагов можно приступить к сборке схемы и заполнению данных (см. рисунок 26).

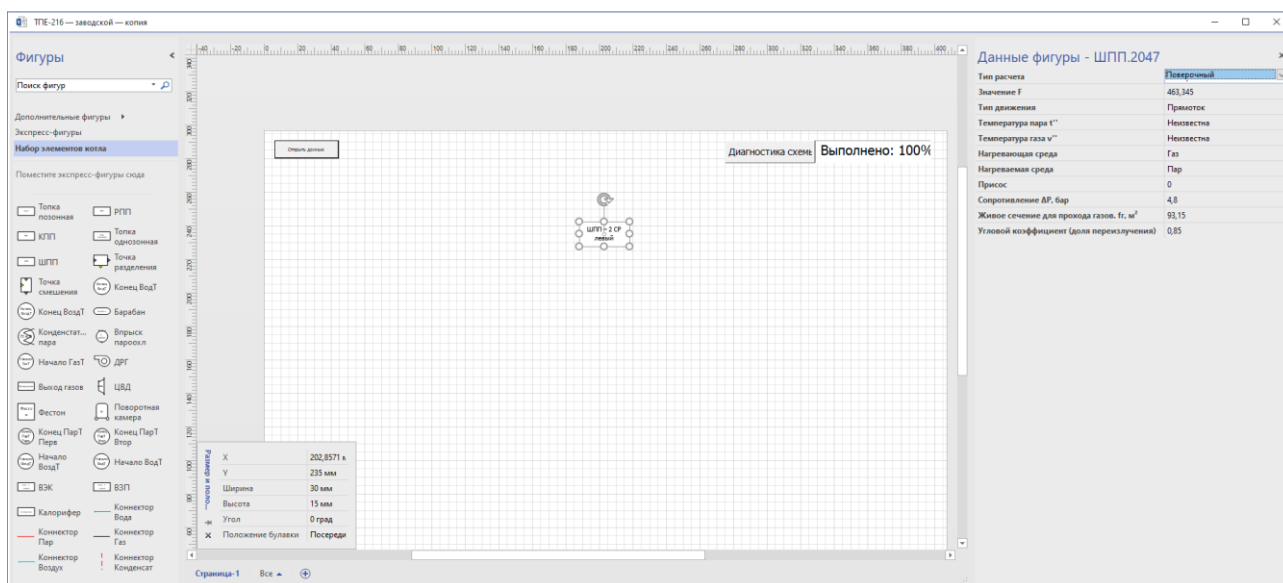


Рисунок 26 – Сборка схемы

Для работы с WinForms приложением необходимо установить его на компьютер (см. рисунки 27-28). Данные скриншоты являются примерными. Для установки необходимо иметь сам установщик (файл setup) и пакет установщика (необходимые компоненты при установке). После запуска установщика необходимо проследовать инструкциям мастера установки и по завершении установки запустить WinForms приложение.

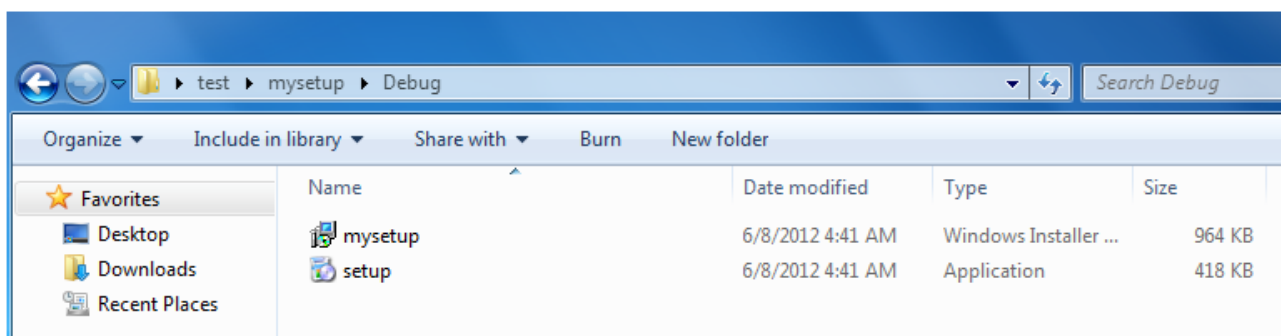


Рисунок 27 – Файлы для установки

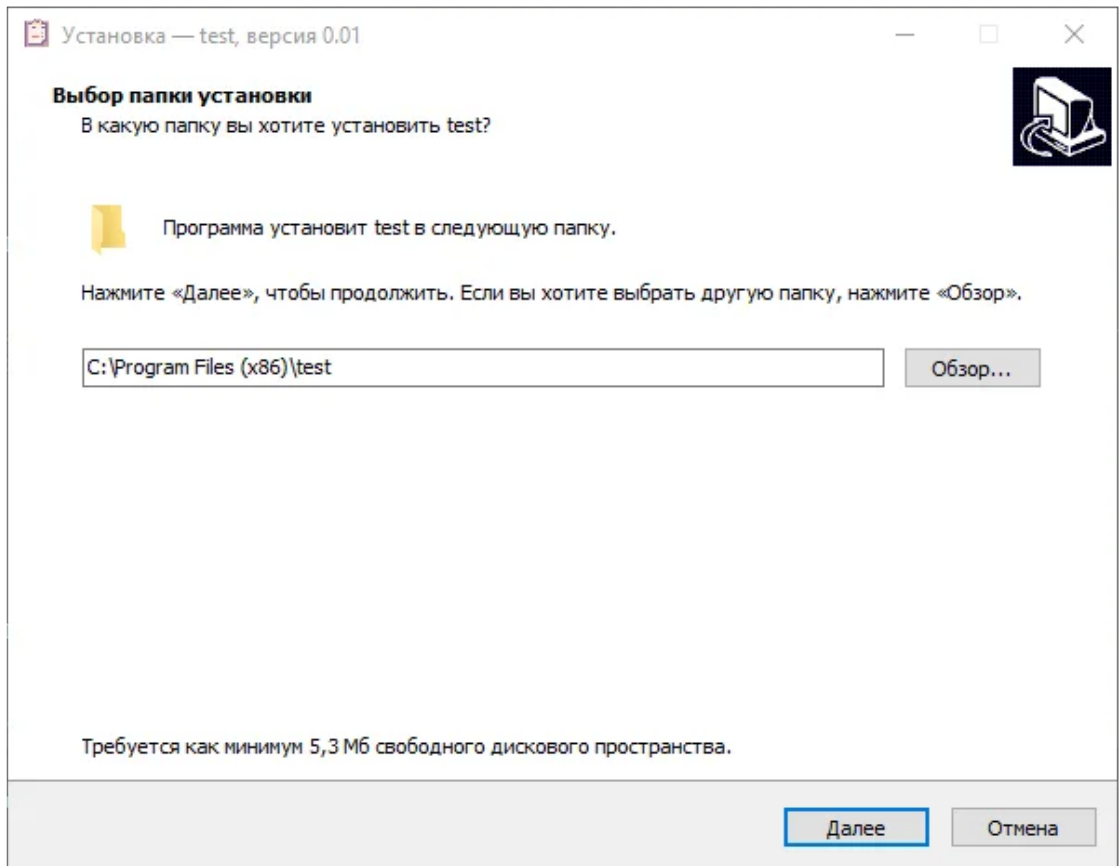


Рисунок 28 – Мастер установки приложения

После запуска WinForms приложения, предстает рабочая область (см. рисунок 29).

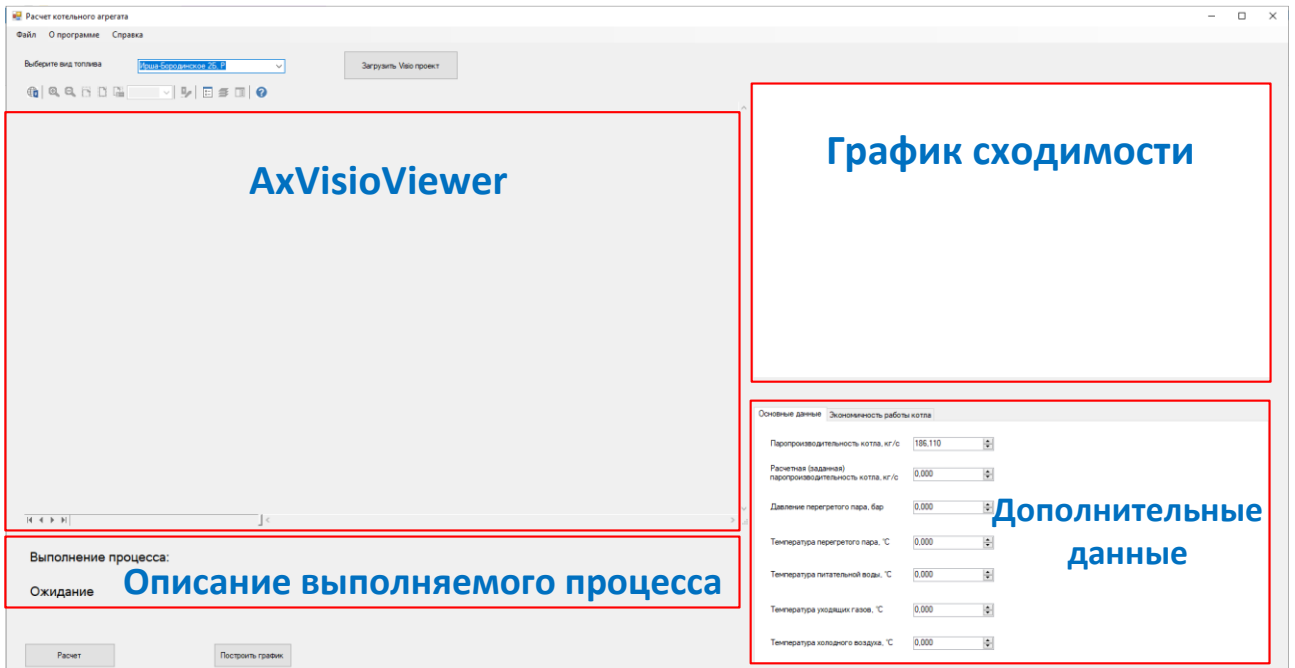


Рисунок 29 – Рабочая область приложения

2.2.5 Входные данные

Входными данными в Visio-приложении являются данные для заполнения фигур после сборки схемы. Программа позволяет делать сборку как полной схемы котлоагрегата, где используются все тракты, так и сборку отдельного тракта, вплоть до расчета одного элемента.

Ключевым условием для корректной сборки является замкнутость тракта. Для этого в трафарете есть endpoint-элементы, которые позволяют замкнуть тракт и перейти к диагностике. Соберем пример работоспособной схемы и разберем заполнение данных на ее примере.

Drag-and-drop-ом перетаскиваем с трафарета на рабочую область нужные элементы и коннекторы и приступаем к сборке. Коннектор необходимо присоединять именно к точке соединения, поскольку присоединения можно осуществить и в целом к фигуре (см. рисунок 30).

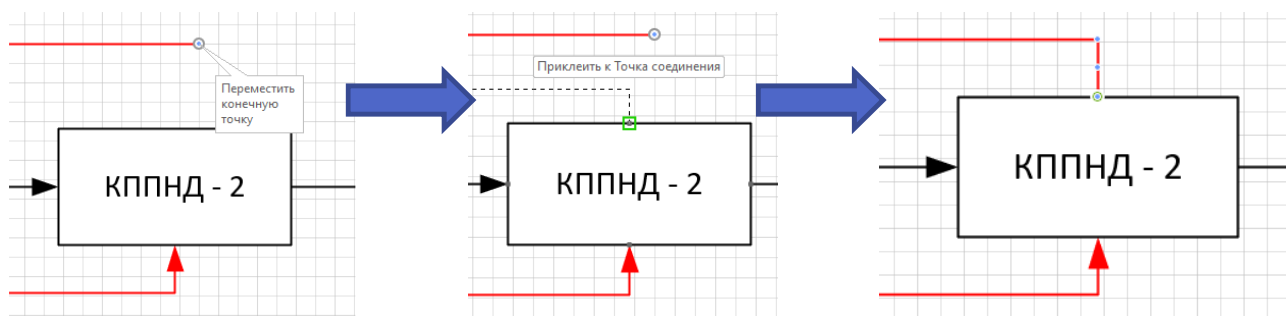
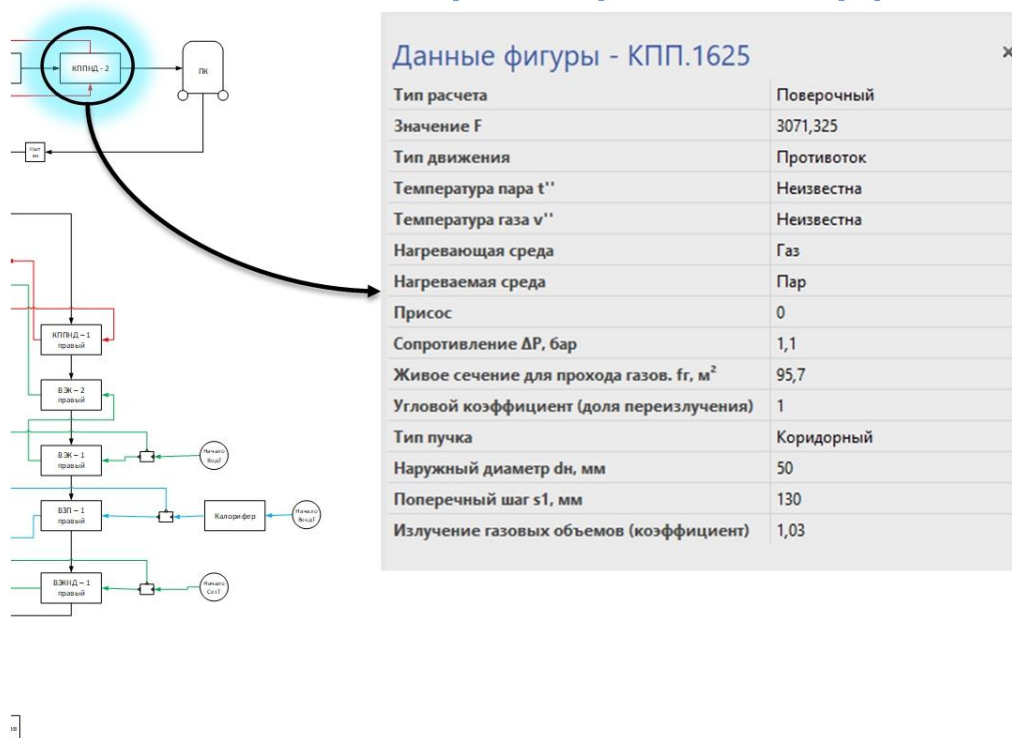


Рисунок 30 – Стадии присоединения коннектора

После соединения всех необходимых компонентов между собой нужно заполнить фигуры данными. На рисунке 31 представлен пример окна со свойствами. В свойствах есть поля с численными данными, куда заносятся произвольные данные, и строковые списки, где выбирается нужное поле. В некоторых элементах выбор определенного значения из списка может скрыть или показать новые поля с данными. Так, например выбор значения «Поверочный» в поле «Тип расчета» показывает поле с заданием площади, а выбор «Конструкторский» скрывает (см. рисунок 32). Таким же образом происходит взаимодействие и с полями для температуры пара и газа. Если сделать эти поля известными, то появится поле для численного задания температуры. В этом случае в качестве неизвестных для расчета будут параметры на входе, и индексы в Shape Data равные 0 проставятся для них на этапе диагностики. Если диагностика не удастся, появится MessageBox в котором будет указано в каком элементе не хватает или превышены исходные данные. В этом случае нужно будет изменить в свойствах исходные данные и произвести диагностику заново.

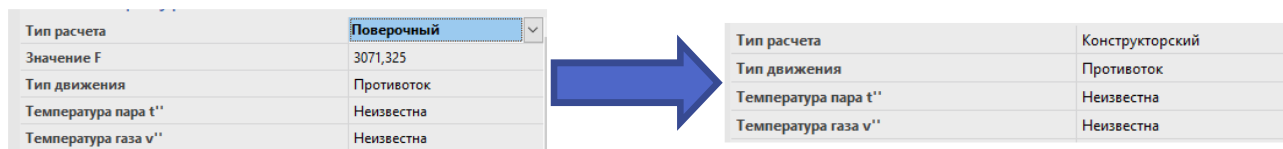
Свойства элемента на примере КППНД - 2



The diagram shows a boiler system with various components. The 'КППНД - 2' element is highlighted in blue. A curved arrow points from this element to a pop-up window titled 'Данные фигуры - КПП.1625'. The window contains the following data:

Данные фигуры - КПП.1625	
Тип расчета	Поверочный
Значение F	3071,325
Тип движения	Противоток
Температура пара t''	Неизвестна
Температура газа v''	Неизвестна
Нагревающая среда	Газ
Нагреваемая среда	Пар
Присос	0
Сопротивление ΔP, бар	1,1
Живое сечение для прохода газов. fr, м ²	95,7
Угловой коэффициент (доля переизлучения)	1
Тип пучка	Коридорный
Наружный диаметр dn, мм	50
Поперечный шаг s1, мм	130
Излучение газовых объемов (коэффициент)	1,03

Рисунок 31 – Пример свойств для элемента



The diagram shows two tables representing the properties of an element before and after a change. A blue arrow points from the first table to the second.

Тип расчета	Поверочный
Значение F	3071,325
Тип движения	Противоток
Температура пара t''	Неизвестна
Температура газа v''	Неизвестна

Тип расчета	Конструкторский
Тип движения	Противоток
Температура пара t''	Неизвестна
Температура газа v''	Неизвестна

Рисунок 32 – Динамическое изменение полей в свойствах

В случае успешно проведенной диагностики появится MessageBox с сообщением: «Успешная диагностика» (см. рисунок 33). После этого схема готова к импорту.

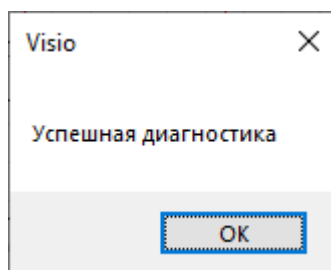


Рисунок 33 – MessageBox после диагностики

Входными данными для WinForms приложения является файл-Visio с успешно завершённой диагностикой.

После запуска приложения необходимо загрузить схему, для этого нужно нажать на кнопку «Загрузить Visio проект» (см. рисунок 34). После загрузки проекта в области AxVisioViewer появится данная схема, в которой можно просмотреть свойства фигур (см. рисунок 35). VisioViewer — это элемент управления ActiveX, который позволяет открывать, просматривать или печатать документы Visio, даже если у вас нет Visio.

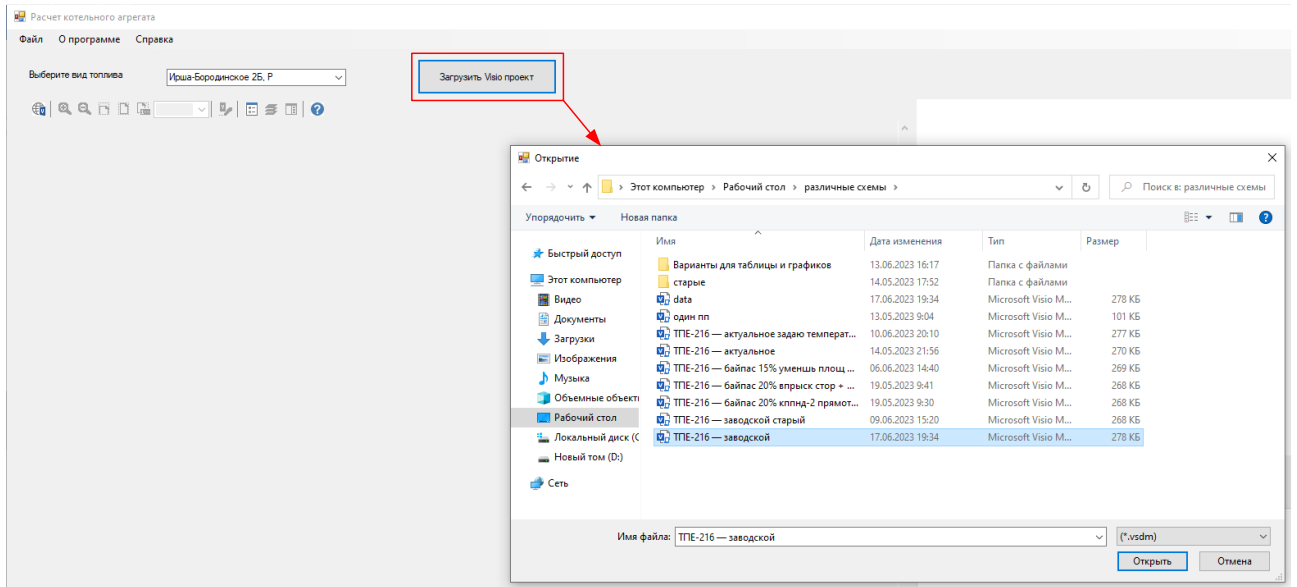


Рисунок 34 – Загрузка Visio-проекта в программу

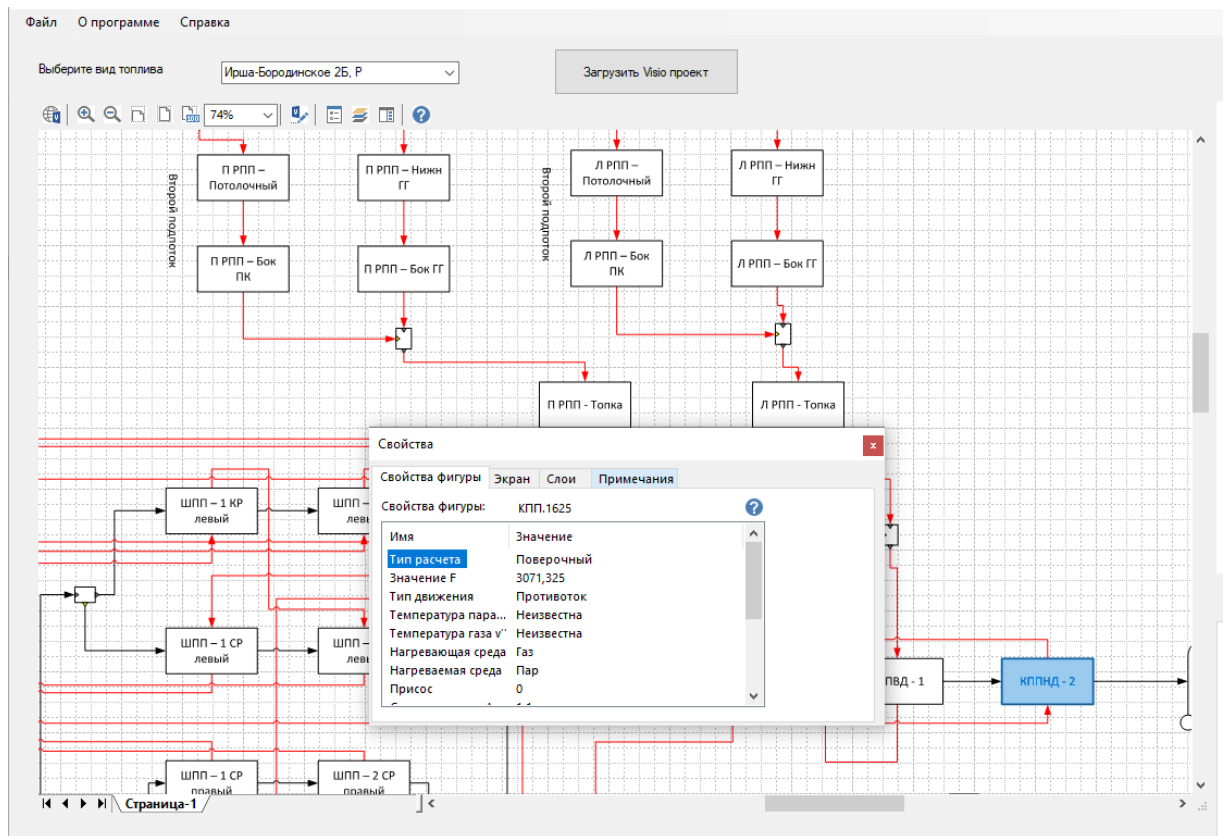


Рисунок 35 – Область AxVisioViewer

Далее необходимо выбрать из ComboBox вид топлива. После можно запустить расчет нажав на кнопку «Расчет».

Справа от AxVisioViewer компонента расположен Chart компонент для построения графиков. Здесь строится график сходимости для каждого тракта. По мере увеличения итераций уточняется температура в тракте, и линия графика приближается к заданной погрешности ε (см. рисунок 36).

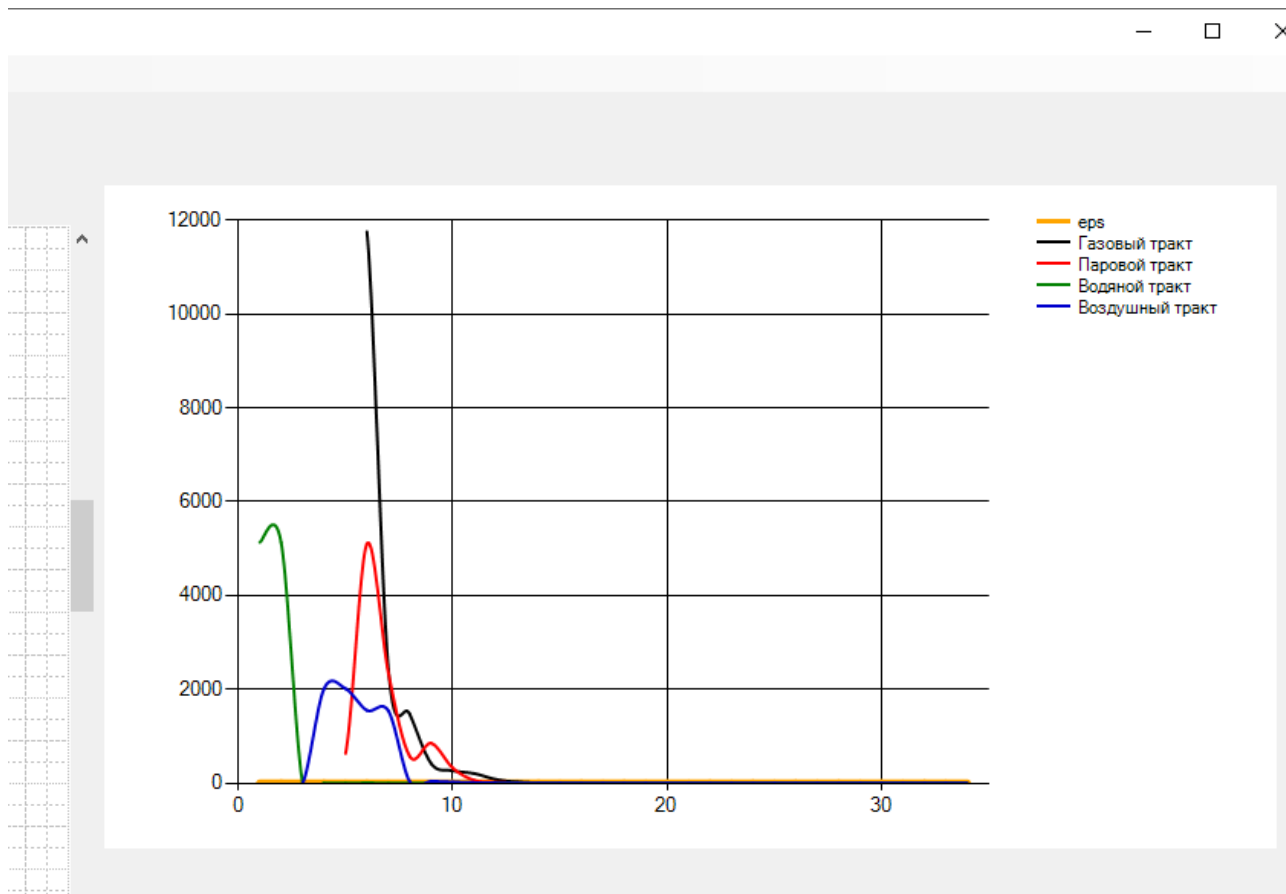


Рисунок 36 – График сходимости

Во время расчета в label под AxVisioViewer компонентом будет обновляться строка с описанием происходящего процесса (см. рисунок 37).

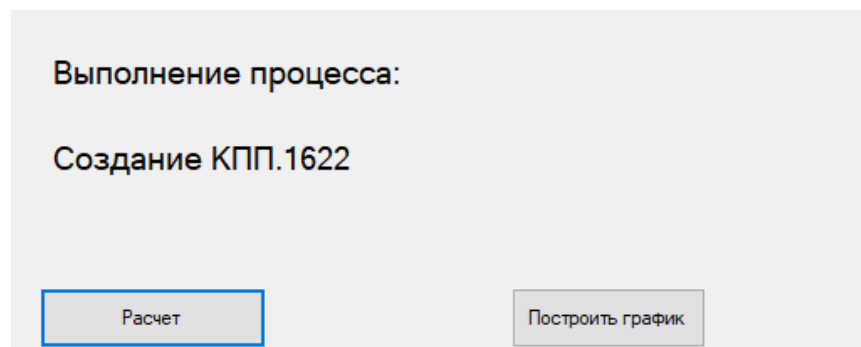


Рисунок 37 – Описание процесса в Label-компоненте

2.2.6 Выходные данные

По окончании расчета в директории указанной при установке формируется файл-Visio, в котором в каждую фигуру заносятся соответствующие рассчитанные данные (см. рисунок 38), а в свойства для страницы заносится информация, относящаяся в целом к котлу (такие как КПД, расход топлива, абсолютная и относительная величина невязки и т.д., см. рисунок 39)



Данные фигуры - КПП.1625	
Температура пара на входе в ПП t' °C	319,949
Энтальпия пара на входе в ПП h' кДж/кг	3050,827
Температура пара на выходе из ПП t'' °C	468,002
Энтальпия пара на выходе из ПП h'' °C	3389,601
Температура газа на входе в ПП v' °C	765,958
Температура газа на входе в ПП v'' °C	649,022
Энтальпия газа на входе в ПП H' кДж/кг	9123,69
Энтальпия газа на выходе из ПП H'' кДж/кг	7622,347
Площадь ПП F , м ²	3071,325
Коэффициент теплопередачи K , Вт/м ² *К	58,869
Температурный напор Δt , К	313,257
Скорость газов w_g , м/с	10,777
Объем газов V_g , м/с	7,592
Давление на входе в ПП P_i , бар	27,23
Давление на выходе из ПП P_{ii} , бар	26,13
Q_b балансовое тепло, кДж/кг	1497,304
V_g расход топлива, кг/с	37,827
D расход пара, кг/с	167,188

Рисунок 38 – Пример рассчитанных данных для поверхности

Данные фигуры - Страница	
Число итераций	34
Расход перегретого пара G_{pv} , кг/с	186,11
Расход вторичного пара D_{vt} , кг/с	167,188
Расчетный расход топлива B_r , кг/с	37,827
Коэффициент сохранения тепла f_i	0,997
Потери q_2	6,478
КПД	92,736
Теплота внешнего подогрева Q_{vvp}	213,821
Абсолютная величина невязки	188,204
Относительная величина невязки	0,032

Рисунок 39 – Пример рассчитанных данных для котла

Также в файле создается вторая страница, на которой строятся оси и проставляются точки, соответствующие температурам в трактах (см. рисунок 40). Данный график служит каркасом, где точки уже имеют верную позицию и остается необходимым только отредактировать: добавить линии, стилизацию, легенду.

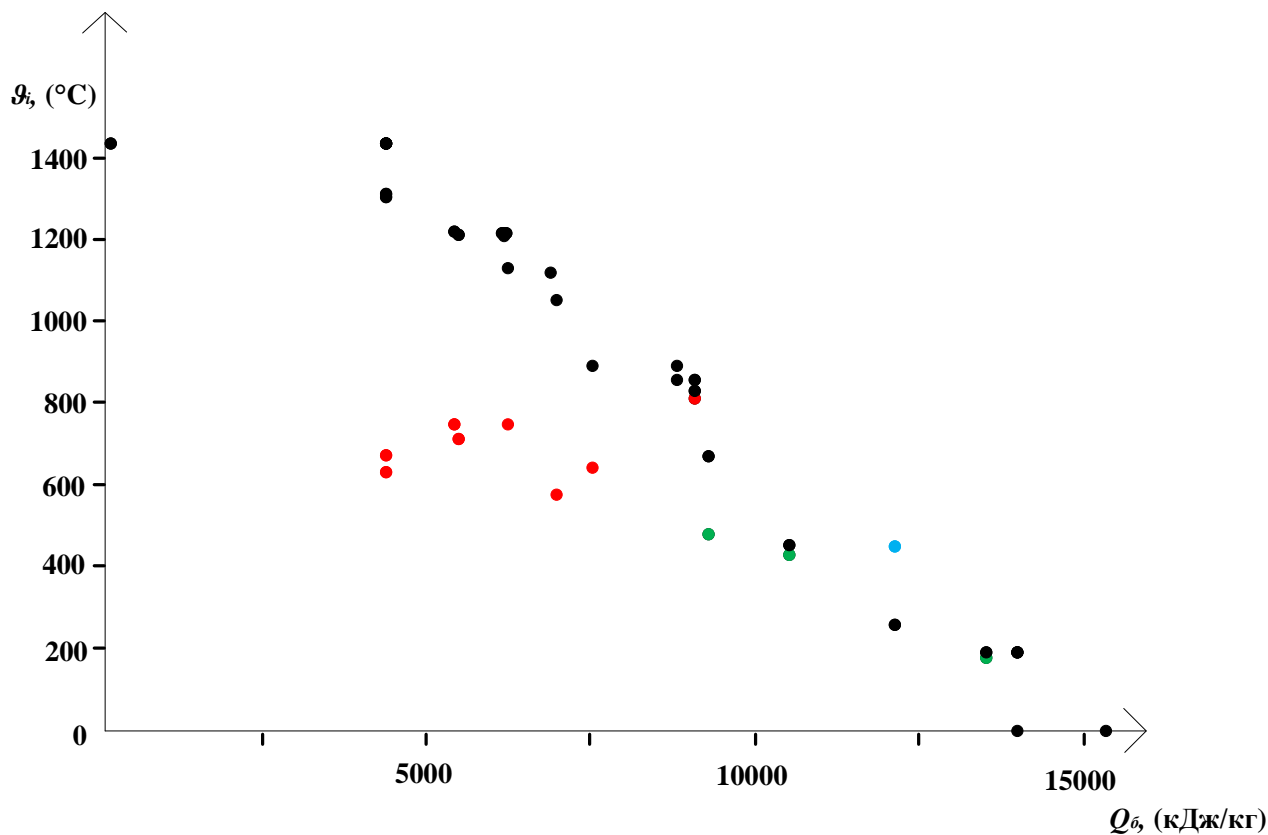


Рисунок 40 – График распределения температур

Полная собранная схема ТПЕ-216 представлена на рисунке 42.

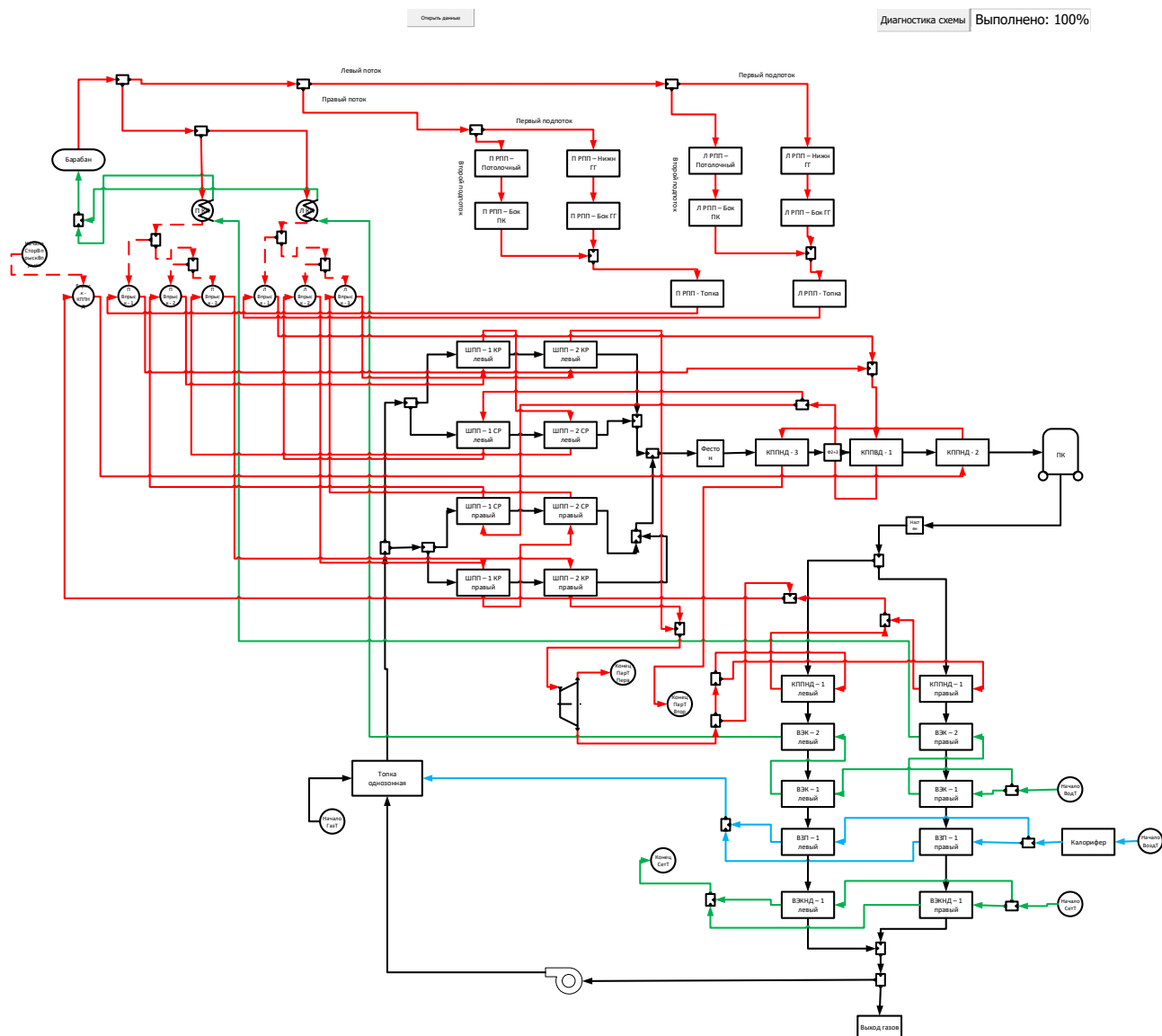


Рисунок 42 – Схема ТПЕ-216 собранная в Visio

Данный расчет выполняется полностью поверочным, данные взяты из заводского расчета.

В таблице 3 представлены данные для занесения в поверхность.

Таблица 3 – Входные данные

Наименование	Обозначение	Значение	
		Топка	
Тип шлакоудаления		ТШУ	
Площадь фронтальной стенки, м ²	F _{фр}	439,9	
Площадь задней стенки, м ²	F _{тыл}	510,77	
Площадь боковой стенки, м ²	F _{бок}	385,59	
Площадь выходного окна, м ²	F _{вок}	257,15	
Ширина топки, м	b _т	13,52	
Высота топки, м	h _т	42,74	
Высота горелок, м	h _г	12,7	
Присос в топке	Δα _т	0,04	
Объем топки, м ³	V _т	6774	
Угловой коэффициент экрана	χ	0,934	
Степень загрязнения	ξ	0,4	
		Правый поток	
		П РПП-Нижн	П РПП-Топка
		ГГ	ГГ
Тип расчета		Поверочный	Поверочный
Площадь ИП, м ²	F	74,3	236,7
Тип РПП		ГГ	В топке
Сопротивление, бар	ΔP	1,8	2,6
		Левый поток	
		Л РПП-Нижн	Л РПП-Топка
		ГГ	ГГ
Тип расчета		Поверочный	Поверочный
Площадь ИП, м ²	F	74,3	236,7
Тип РПП		ГГ	В топке
Сопротивление, бар	ΔP	1,8	2,6

Продолжение таблицы 3

Наименование	Обозначение	Значение							
		ШПП-1КР Левый	ШПП-1СР Левый	ШПП-2КР Левый	ШПП-2СР Левый	ШПП-1КР Правый	ШПП-1СР Правый	ШПП-2КР Правый	ШПП-2СР Правый
Тип расчета		Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный
Площадь ПП, м ²	F	485,93	494,371	483,803	463,345				
Тип движения		Прямоток	Прямоток	Прямоток	Прямоток				
Присос воздуха	Δα	0	0	0	0				
Сопротивление, бар	ΔP	4,8	4,2	3,9	4,8				
Живое сечение для прохода газов, м ²	f _г	103,2	103,2	93,15	93,15				
Угловой коэффициент	x	0,85	0,85	0,85	0,85				
Тип расчета		Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный
Площадь ПП, м ²	F	485,93	494,371	483,803	463,345				
Тип движения		Прямоток	Прямоток	Прямоток	Прямоток				
Доля присоса воздуха	Δα	0	0	0	0				
Сопротивление, бар	ΔP	4,8	4,2	3,9	4,8				
Живое сечение для прохода газов, м ²	f _г	103,2	103,2	93,15	93,15				
Угловой коэффициент (доля переизлучения)	x	0,85	0,85	0,85	0,85				
Тип расчета		Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный
Площадь ПП, м ²	F	1544,817	917,289	3071,325	552,853				
Тип движения		Прямоток	Противоток	Противоток	Противоток				
Доля присоса воздуха	Δα	0	0	0	0				
Сопротивление, бар	ΔP	0,7	1,6	1,1	0,7				
Живое сечение для прохода газов, м ²	f _г	124	87,4	95,7	42				

Продолжение таблицы 3

Наименование	Обозначение	Значение					
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый	
Угловой коэффициент доля переизлучения	x	1	1	1	1	1	
Тип пучка		Коридорный	Коридорный	Коридорный	Шахматный	Шахматный	
Наружный диаметр труб, мм	d_n	60	42	50	42	42	
Поперечный шаг, мм	s_1	260	130	130	138	138	
Излучение газовых объемов		1,08	1,03	1,03	1,08	1,08	
		ВЭК-2 Левый	ВЭК-1 Левый	ВЭК-2 Правый	ВЭК-1 Правый	ВЭК-1 Правый	
Тип расчета		Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Противоток	
Площадь ПП, м ²	F	1387	3291,706	1387	3291,706	3291,706	
Тип движения		Противоток	Противоток	Противоток	Противоток	Противоток	
Доля присоса воздуха	$\Delta\alpha$	0	0,008	0	0	0,008	
Сопротивление, бар	ΔP	1,3	1	1,3	1,3	1	
Живое сечение для прохода газов, м ²	f_r	43,9	43,9	43,9	43,9	43,9	
Угловой коэффициент (доля переизлучения)	x	1	1	1	1	1	
Мембранный		Да	Да	Да	Да	Да	
Наружный диаметр, мм	d_n	28	28	28	28	28	
Поперечный шаг, мм	s_1	120	120	120	120	120	
Излучение газовых объемов		1	1	1	1	1	
		ВЗП-1 Левый	ВЗП-1 Левый	ВЗП-1 Правый	ВЗП-1 Правый	ВЗП-1 Правый	
Тип расчета		Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	Поверочный	
Площадь ПП, м ²	F	3790	3790	3790	3790	3790	
Тип движения		Противоток	Противоток	Противоток	Противоток	Противоток	
Доля присоса воздуха	$\Delta\alpha$	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	
Живое сечение для прохода газов, м ²	f_r	22,75	22,75	22,75	22,75	22,75	

Продолжение таблицы 3

Наименование	Обозначение	Значение	
		ВЗП-1 Левый	ВЗП-1 Правый
Доля переизлучения	x	1	1
Коэффициент использования поверхности	$\xi_0 + \Delta\xi$	0,9 + 0,05	0,9 + 0,05
Скорость газов, м/с	ω_r	13,2	13,2
Скорость воздуха, м/с	$\omega_{в}$	6,6	6,6
Тип расчета		ВЭК НД-1 Левый	ВЭК НД-1 Правый
Площадь ПП, м ²	F	Поверочный 3733,767	Поверочный 3733,767
Тип движения		Противоток	Противоток
Доля присоса воздуха	$\Delta\alpha$	0,011	0,011
Сопротивление, бар	ΔP	1,14	1,14
Живое сечение для прохода газов, м ²	f_r	56	56
Доля переизлучения	x	1	1
Мембранный		Да	Да
Наружный диаметр, мм	d_n	28	28
Поперечный шаг, мм	s_1	100	100
Излучение газовых объемов		1	1
		НачалоВодТ	НачалоВоздТ
Температура среды на входе, °С	t'	238	30
Давление среды на входе, бар	p'	167	-
Расход питательной воды, т/ч	G	670	-
Коэффициент избытка воздуха на входе в ВЗП	β	-	1,119
			НачалоСегТ
			94
			17,14
			495
			-

Окончание таблицы 3

Наименование	Обозначение	Значение						
		СторВПР	П ВПР-1	П ВПР-2	П ВПР-3	Л ВПР-1	Л ВПР-2	Л ВПР-3
Расход на впрыск, т/ч	G	25	7	8	2,5	7	8	2,5
Давление впрыска, бар	P'	26,6	164,7	164,7	164,7	164,7	164,7	164,7
Температура впрыска, °С	t'	226	349,6	349,6	349,6	349,6	349,6	349,6
Калорифер								
Температура воздуха на выходе, °С	t''	60						
ЦВД								
Доля расхода пара в отборы, %	$D_{\text{осн}}$	13,88						
Доля пара на перегрев, %	$D_{\text{альт}}$	86,12						
Давление пара на выходе из ЦВД, бар	P''	27,3						
Температура пара на выходе из ЦВД, °С	t''	335						

Данные по точкам разделения и точкам смешения не сводятся в таблицу поскольку все потоки делятся 50 на 50. Единственной точкой разделения, которая имеет другое соотношение расходов это точка осуществляющая байпас КПШ НД-1 (в КПШ НД-1 идет 10% пара, 90% возвращается в линию после КПШ НД-1).

В таблице 4 представлены данные после расчета.

Таблица 4 – Выходные данные

Наименование	Обозначение	Значение ТПЕ-216
Число итераций	$i_{тер}$	34
Расход перегретого пара, т/ч	$D_{пе}$	670
Расход вторичного пара, т/ч	$D_{вт}$	601,9
Расчетный расход топлива, т/ч	B_r	136,22
Коэффициент сохранения тепла	ϕ	0,997
Потеря уходящими газами, %	q_2	6,478
Потеря с хим. недожогом, %	q_3	0
Потеря с мех. недожогом, %	q_4	0,5
Потеря от наружного охлаждения, %	q_5	0,25
Потеря теплоты с физическим теплом шлака, %	q_6	0,036
КПД, %	η_k	92,736
Теплота внешнего подогрева воздуха, кДж/кг	$Q_{внш}$	213,821
Абсолютная величина невязки	ΔQ	4,98
Относительная величина невязки, %	δQ	0,032
		Топка
Адиабатная температура газа, °С	ϑ_a	1432
Температура газа на выходе из топки, °С	ϑ''	1044,3
Полезное тепловыделение в топочной камере, кДж/кг	Q_r	17683,74
Энтальпия газа на выходе из топки, кДж/кг	H''	12791,5
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,592
Коэффициент рециркуляции	r	0,24

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение				
		ПРПП-Потолочный	П РПП-Бок ПК	П РПП-Нижн ГГ	П РПП-Бок ГГ	П РПП-Топка
Критерий Бугера	$B_{и}$					Топка 1,798
Критерий М	M					0,499
Воспринятое тепло, кДж/кг	$Q_{л}$					4879,04
Среднее теплонепределение экранов топки, кВт/м ²	$q_{л}$					95,163
Теплота излучения из топки, кДж/кг	$Q_{л\text{ вых}}$					545,137
Параметр забалластированности	r_{ν}					1,861
Избыток горячего воздуха на входе в топку	$\alpha_{гор}$					1,1
Избыток воздуха на выходе из топки	α''					1,2
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	2575,37	2717,11	2575,37	2612,43	2727,02
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	2717,11	2820,4	2612,43	2658,37	2931,33
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	349,6	362,9	349,6	351,7	366
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	362,9	376,4	351,7	355	396
Давление пара на входе, бар	p'	164,7	141,7	164,7	162,9	161,9
Давление пара на выходе, бар	p''	163,9	163,9	162,9	161,9	159,3
Расход пара, кг/с	$D_{п}$	41,665	41,665	46,533	46,533	88,198

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение				
		Л РПП-Потолочный	Л РПП-Бок ПК	Л РПП-Нижн ГГ	Л РПП-Бок ГГ	Л РПП-Топка
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	2575,37	2717,11	2575,37	2612,43	2727,02
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	2717,11	2820,4	2612,43	2658,37	2931,33
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	349,6	362,9	349,6	351,7	366
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	362,9	376,4	351,7	355	396
Давление пара на входе, бар	p'	164,7	141,7	164,7	162,9	161,9
Давление пара на выходе, бар	p''	163,9	163,9	162,9	161,9	159,3
Расход пара, кг/с	$D_{п}$	41,665	41,665	46,533	46,533	88,198
		ШПП-1КР Левый	ШПП-1СР Левый	ШПП-2КР Левый	ШПП-2СР Левый	
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	3146,9	3037,1	3358,1	3282,6	3282,6
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	3282,6	3184,2	3445,6	3370,86	3370,86
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	448,5	420	514,4	490	490
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	490	460	545	519	519
Энтальпия газа на входе в ПШ, кДж/кг	H'	12791,5	12791,5	11578,6	11502,1	11502,1
Энтальпия газа на выходе из ПШ, кДж/кг	H''	11578,6	11502,1	10732,3	10655,3	10655,3
Температура газа на входе в ПШ, °С	g'	1044,3	1044,3	954,7	949	949

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение			
		ШПП-1КР Левый	ШПП-1СР Левый	ШПП-2КР Левый	ШПП-2СР Левый
Температура газа на выходе из ПШ, °С	g''	954,7	949	887,6	882
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	44,6	44,4	42,4	42,1
Температурный напор, °С	Δt	527,5	553,9	389,4	409
Скорость газов, м/с	ω_r	3,24	3,23	3,37	3,35
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,592	7,592	7,592	7,592
Давление пара на входе, бар	p'	153,5	157,7	143,9	148,7
Давление пара на выходе, бар	p''	148,7	153,5	140	143,9
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^o	1209,6	1285,9	884,1	844,54
Расход топлива, кг/с	B_r	9,457	9,457	9,457	9,457
Расход пара, кг/с	$D_{п}$	92,361	90,141	93,055	92,361
Лучистое тепло, кДж/кг	Q''	115,84	115,84	17,37	17,37
Избыток воздуха на входе в ПШ	α'	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ПШ	α''	1,2	1,2	1,2	1,2
		ШПП-1КР Правый	ШПП-1СР Правый	ШПП-2КР Правый	ШПП-2СР Правый
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	3146,9	3037,1	3358,1	3282,6
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	3282,6	3184,2	3445,6	3370,86
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	448,5	420	514,4	490
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	490	460	545	519

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение				
		ШПП-1КР Правый	ШПП-1СР Правый	ШПП-2КР Правый	ШПП-2СР Правый	
Энтальпия газа на входе в ПШ, кДж/кг	H'	12791,5	12791,5	11578,6	11578,6	11502,1
Энтальпия газа на выходе из ПШ, кДж/кг	H''	11578,6	11502,1	10732,3	10732,3	10655,3
Температура газа на входе в ПШ, °С	g'	1044,3	1044,3	954,7	954,7	949
Температура газа на выходе из ПШ, °С	g''	954,7	949	887,6	887,6	882
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	44,6	44,4	42,4	42,4	42,1
Температурный напор, °С	Δt	527,5	553,9	389,4	389,4	409
Скорость газов, м/с	ω_r	3,24	3,23	3,37	3,37	3,35
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,592	7,592	7,592	7,592	7,592
Давление пара на входе, бар	p'	153,5	157,7	143,9	143,9	148,7
Давление пара на выходе, бар	p''	148,7	153,5	140	140	143,9
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	1209,6	1285,9	884,1	884,1	844,54
Расход топлива, кг/с	B_r	9,457	9,457	9,457	9,457	9,457
Расход пара, кг/с	D_n	92,361	90,141	93,055	93,055	92,361
Лучистое тепло, кДж/кг	Q''	115,84	115,84	17,37	17,37	17,37
Избыток воздуха на входе в ПШ	α'	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ПШ	α''	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	3389,6	2903,5	3050,8	3086,8	3086,8

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение				
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	3561,6	3037,1	3389,6	3664,1	3664,1
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	468	390,4	320	335	335
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	545	420	468	591	591
Энтальпия газа на входе в ПШ, кДж/кг	H'	10626,8	9762	9123,7	7306,8	7306,8
Энтальпия газа на выходе из ПШ, кДж/кг	H''	9867,5	9123,7	7622,3	7061,5	7061,5
Температура газа на входе в ПШ, °С	g'	879,8	814,7	766	624	624
Температура газа на выходе из ПШ, °С	g''	822,6	766	649	604,5	604,5
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	54,5	68,2	58,8	74,3	74,3
Температурный напор, °С	Δt	340,3	385	313,2	112,6	112,6
Скорость газов, м/с	ω_r	9,537	12,8	10,77	11,11	11,11
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,592	7,592	7,592	7,592	7,592
Давление пара на входе, бар	p'	26,13	159,3	27,23	27,3	27,3
Давление пара на выходе, бар	p''	25,43	157,7	26,13	26,6	26,6
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	757,2	636,62	1497,3	244,6	244,6
Расход топлива, кг/с	B_r	37,827	37,827	37,827	18,914	18,914
Расход пара, кг/с	D_n	167,188	180,281	167,188	8,014	8,014
Лучистое тепло, кДж/кг	Q^n	3,06	0	0	0	0

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение					
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый	КПП НД-1 Правый
Избыток воздуха на входе в ПШ	α'	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ПШ	α''	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Энтальпия воды на входе в ВЭК, кДж/кг	h'	1410,5	1030,1	1410,5	1410,5	1410,5	1030,1
Энтальпия воды на выходе из ВЭК, кДж/кг	h''	1701,5	1410,5	1701,5	1701,5	1701,5	1410,5
Температура воды на входе в ВЭК, °С	t'	313	238	313	313	313	238
Температура воды на выходе из ВЭК, °С	t''	349,6	313	349,6	349,6	349,6	313
Энтальпия газа на входе в ВЭК, кДж/кг	H'	7061,5	5626,2	7061,5	7061,5	7061,5	5626,2
Энтальпия газа на выходе из ВЭК, кДж/кг	H''	5626,2	3750,8	5626,2	5626,2	5626,2	3750,8
Температура газа на входе в ВЭК, °С	ϑ'	604,5	488,3	604,5	604,5	604,5	488,3
Температура газа на выходе из ВЭК, °С	ϑ''	488,3	330,3	488,3	488,3	488,3	330,3
Коэффициент теплопередачи, $V_T/(m^2 \cdot K)$	k	92,6	83,11	92,6	92,6	92,6	83,11
Температурный напор, °С	Δt	210,7	129,4	210,7	210,7	210,7	129,4
Скорость газов, м/с	ω_T	9,8	8,193	9,8	9,8	9,8	8,193
Объем газов, м ³ /кг	V_T	7,592	7,608	7,592	7,592	7,592	7,608
Давление воды на входе, бар	p'	166	167	166	166	166	167
Давление воды на выходе, бар	p''	164,7	166	164,7	164,7	164,7	166

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение			
		ВЭК-2 Левый	ВЭК-1 Левый	ВЭК-2 Правый	ВЭК-1 Правый
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^6	1431,5	1871,7	1431,5	1871,7
Расход топлива, кг/с	B_r	18,914	18,914	18,914	18,914
Расход воды, кг/с	G_B	93,055	93,055	93,055	93,055
Лучистое тепло, кДж/кг	Q^H	0	0	0	0
Степень сухости на входе	x'	0	0	0	0
Степень сухости на выходе	x''	0,035	0	0,035	0
Избыток воздуха на входе в ВЭК	α'	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ВЭК	α''	1,2	1,208	1,2	1,208
		ВЗП-1 Левый		ВЗП-1 Правый	
Энтальпия воздуха на входе в ВЗП, кДж/кг	h'	353,84		353,84	
Энтальпия воздуха на выходе из ВЗП, кДж/кг	h''	1832		1832	
Температура воздуха на входе в ВЗП, °С	t'	65		65	
Температура воздуха на выходе из ВЗП, °С	t''	328		328	
Энтальпия газа на входе в ВЗП, кДж/кг	H'	3750,8		3750,8	
Энтальпия газа на выходе из ВЗП, кДж/кг	H''	2126,9		2126,9	
Температура газа на входе в ВЗП, °С	ϑ'	330,3		330,3	
Температура газа на выходе из ВЗП, °С	ϑ''	188,6		188,6	

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение	
		ВЗП-1 Левый	ВЗП-1 Правый
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	26,84	26,84
Температурный напор, °С	Δt	30,5	30,5
Скорость газов, м/с	ω_r	13,2	13,2
Скорость воздуха, м/с	ω_b	6,6	6,6
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,665	7,665
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	1640	1640
Расход топлива, кг/с	B_r	18,914	18,914
Лучистое тепло, кДж/кг	$Q^{\text{л}}$	0	0
Избыток воздуха на входе в ВЗП	α'	1,208	1,208
Избыток воздуха на выходе из ВЗП	α''	1,227	1,227
		ВЭК НД-1 Левый	ВЭК НД-1 Правый
Энтальпия воды на входе в ВЭК, кДж/кг	h'	395,4	395,4
Энтальпия воды на выходе из ВЭК, кДж/кг	h''	547,2	547,2
Температура воды на входе в ВЭК, °С	t'	94	94
Температура воды на выходе из ВЭК, °С	t''	130	130
Энтальпия газа на входе в ВЭК, кДж/кг	H'	2126,9	2126,9
Энтальпия газа на выходе из ВЭК, кДж/кг	H''	1574	1574
Температура газа на входе в ВЭК, °С	ϑ'	188,6	188,6

Продолжение таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение					
		ВЭК НД-1 Левый	ВЭК НД-1 Правый	Л ВПР-1	П ВПР-1	Л ВПР-2	П ВПР-2
Температура газа на выходе из ВЭК, °С	g''	139,6	139,6				
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	54	54				
Температурный напор, °С	Δt	51,9	51,9				
Скорость газов, м/с	ω_r	4,18	4,18				
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,729	7,729				
Давление воды на входе, бар	p'	17,14	17,14				
Давление воды на выходе, бар	p''	16	16				
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^6	553,2	553,2				
Расход топлива, кг/с	B_r	18,914	18,914				
Расход воды, кг/с	G_B	68,75	68,75				
Лучистое тепло, кДж/кг	Q''	0	0				
Степень сухости на входе	x'	0	0				
Степень сухости на выходе	x''	0	0				
Избыток воздуха на входе в ВЭК	α'	1,227	1,227				
Избыток воздуха на выходе из ВЭК	α''	1,238	1,238				
	СторВПР	П ВПР-1	Л ВПР-1	П ВПР-2	Л ВПР-2	П ВПР-3	Л ВПР-3
Энтальпия пара на входе во ПО, кДж/кг	h'	3144,5	2931,3	3184,2	2931,3	3370,86	3370,86
Энтальпия пара на выходе из ПО, кДж/кг	h''	3050,8	2903,5	3146,9	2903,5	3358,1	3358,1
Температура пара на входе в ПО, °С	t'	359,6	396	460	396	519	519

Окончание таблицы 4

Наименование	Обозначение	Значение						
		СторВПР	П ВПР-1	П ВПР-2	П ВПР-3	Л ВПР-1	Л ВПР-2	Л ВПР-3
Температура пара на выходе из ПО, °С	t''	320	390,4	448,5	514,3	390,4	448,5	514,3
Расход конденсата на впрыск, кг/с	$G_{\text{впр}}$	6,91	1,943	2,221	0,694	1,943	2,221	0,694
Расход пара, кг/с	$D_{\text{п}}$	167,2	90,141	92,361	93,055	90,141	92,361	93,055

На рисунке 43 представлен график распределения температур по трактам.

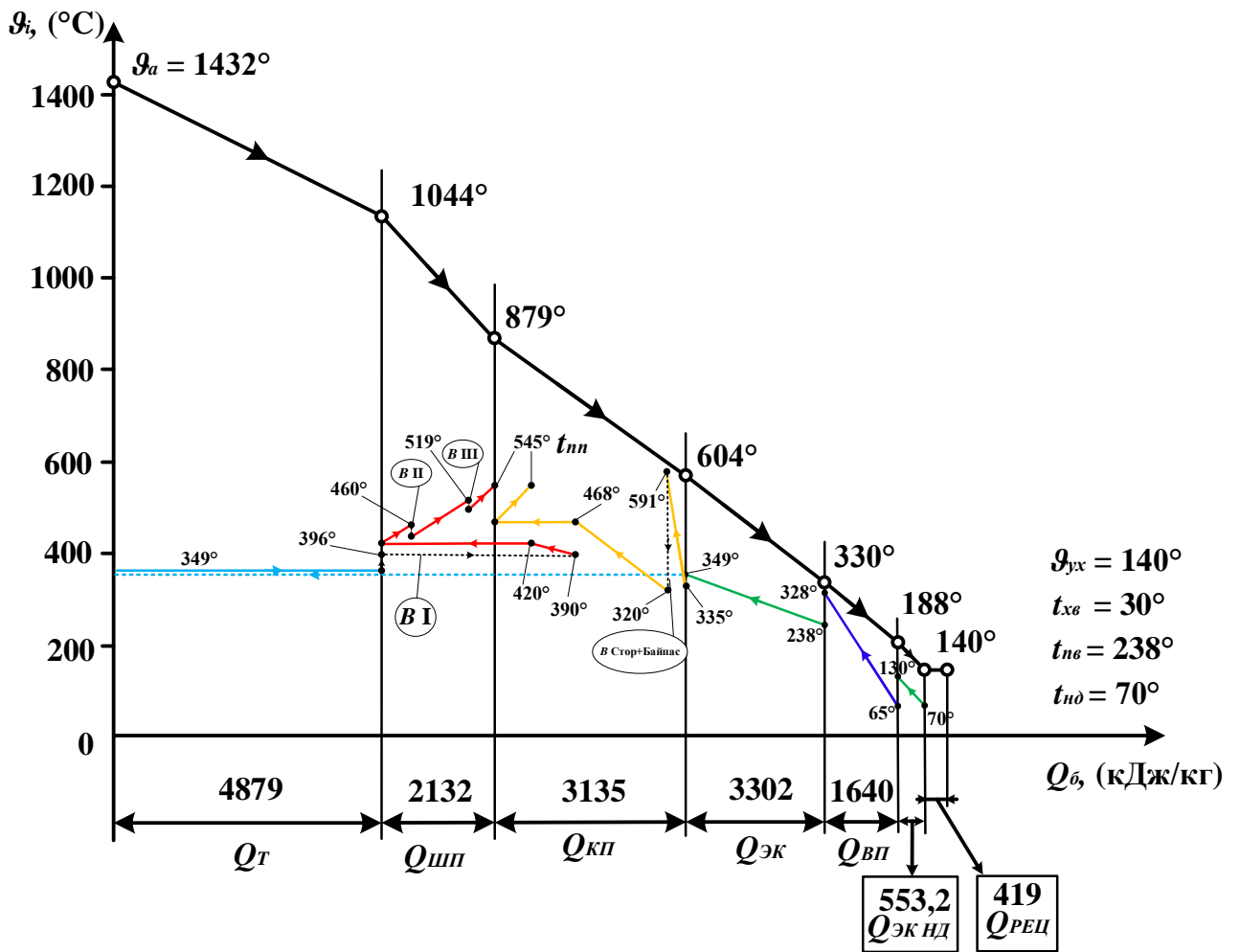


Рисунок 43 – График распределения температур по трактам

3 Расчетная часть

3.1 Анализ чувствительности для необходимых температур и выбор предпочтительных вариантов

Целью работы является предложение оптимального варианта по устранению перегрева КПП НД-1 с сохранением проектных значений на выходе из котла.

Для отбора удовлетворительных решений необходимо рассмотреть влияние различных факторов на температуру пара после КПП НД-1 $t''_{\text{КПП НД-1}}$, температуру перегретого пара $t_{\text{пе}}$ и температуру вторичного пара $t_{\text{вт}}$.

В качестве факторов для изменения были выбраны:

- уменьшение площади КПП НД-1 на 10%, 20%, 30%;
- уменьшение площади КПП НД-2 на 10%, 20%, 30%;

- уменьшение площади КПП НД-3 на 10%, 20%, 30%;
- увеличение доли пускаемого пара в КПП НД-1 на 5%, 10%, 15%;
- изменение типа движения теплоносителей КПП НД-1 на прямоток;
- изменение типа движения теплоносителей КПП НД-2 на прямоток;
- изменение типа движения теплоносителей КПП НД-3 на прямоток;
- увеличение доли газов рециркуляции на 2,5%, 5%, 7,5%.

В данной схеме не рассматривалось влияние увеличения расхода стороннего впрыска поскольку в заводском расчете уже достигнуто максимальное значение в 25 т/ч.

Поскольку задача оптимизации с рассмотрением множества вариантов практически не осуществима при ручном расчете, то в данном случае расчет осуществляется с помощью специализированного ПО. Для построения графиков 54 раза был произведен пересчет схемы.

Графики чувствительности для трех температур представлены на рисунках 44-46.

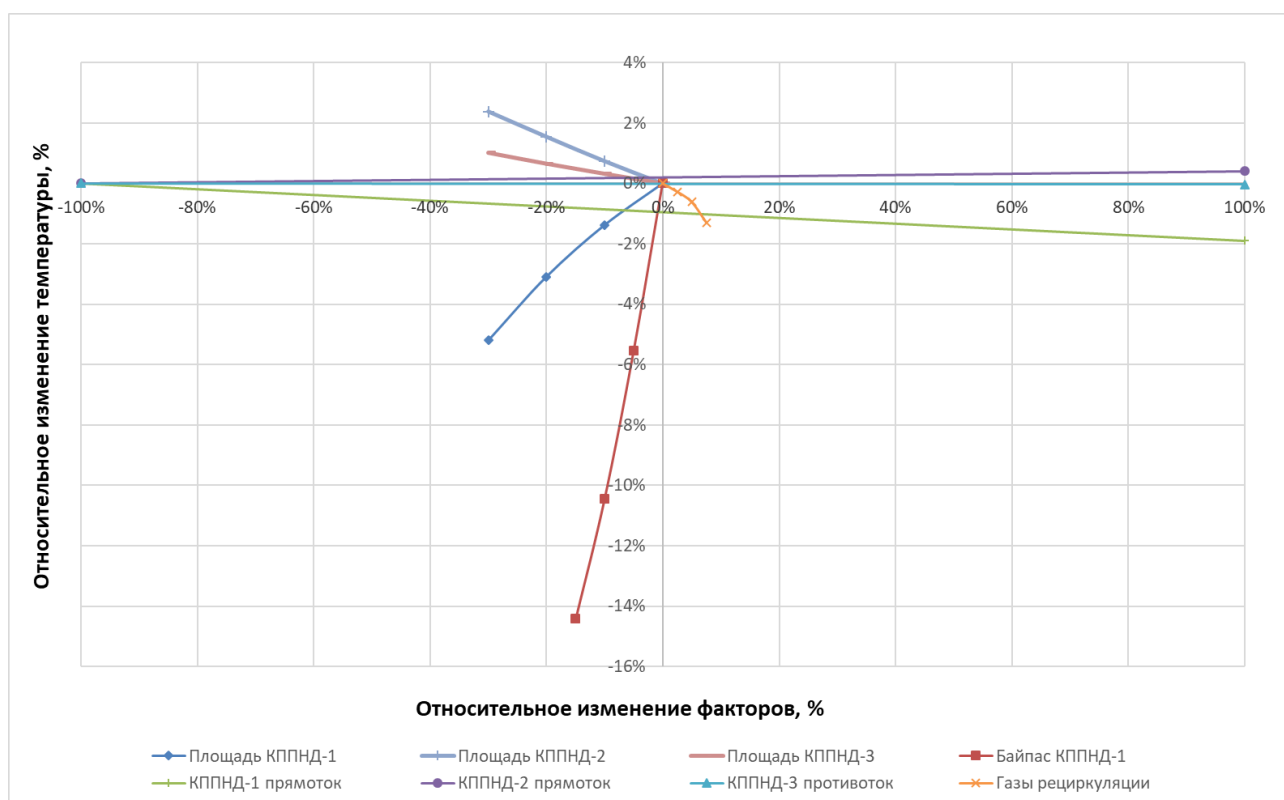


Рисунок 44 – Влияние факторов на температуру после КПП НД-1

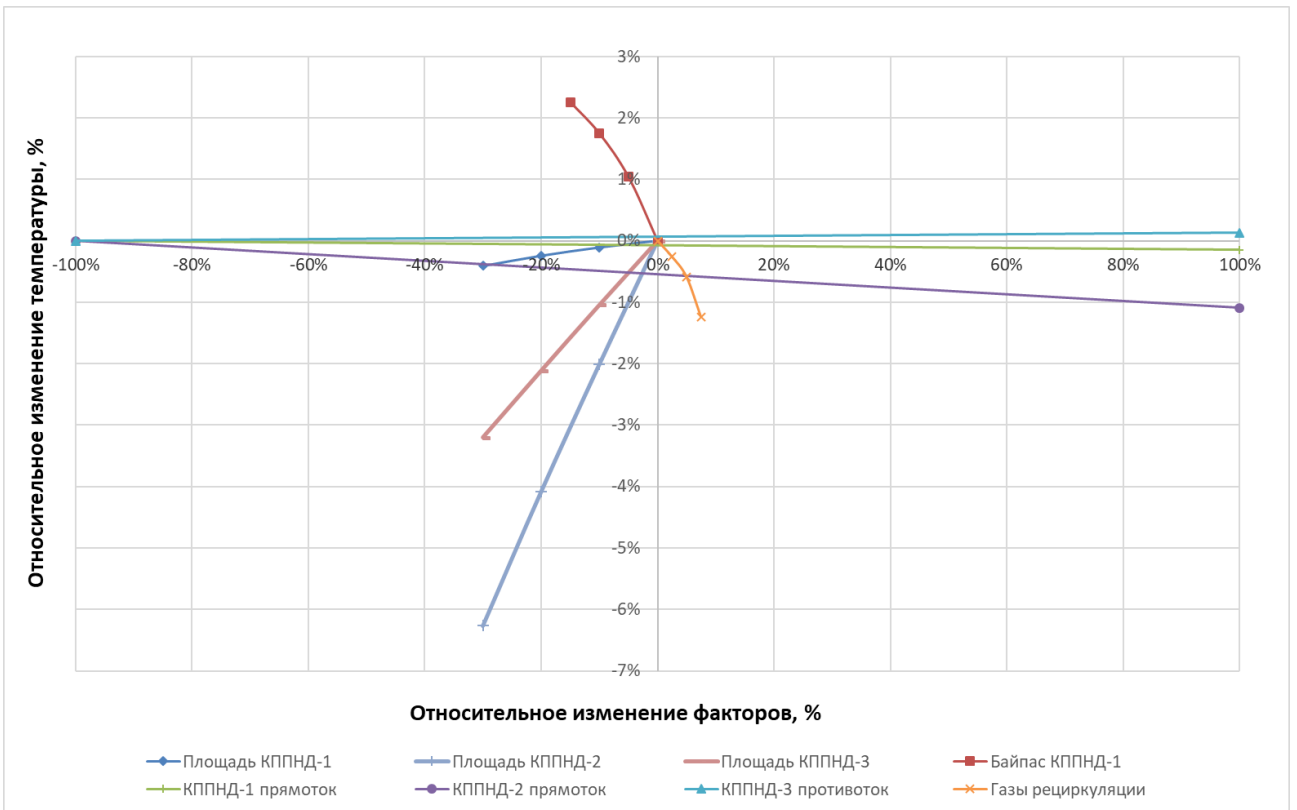


Рисунок 45 – Влияние факторов на температуру перегретого пара

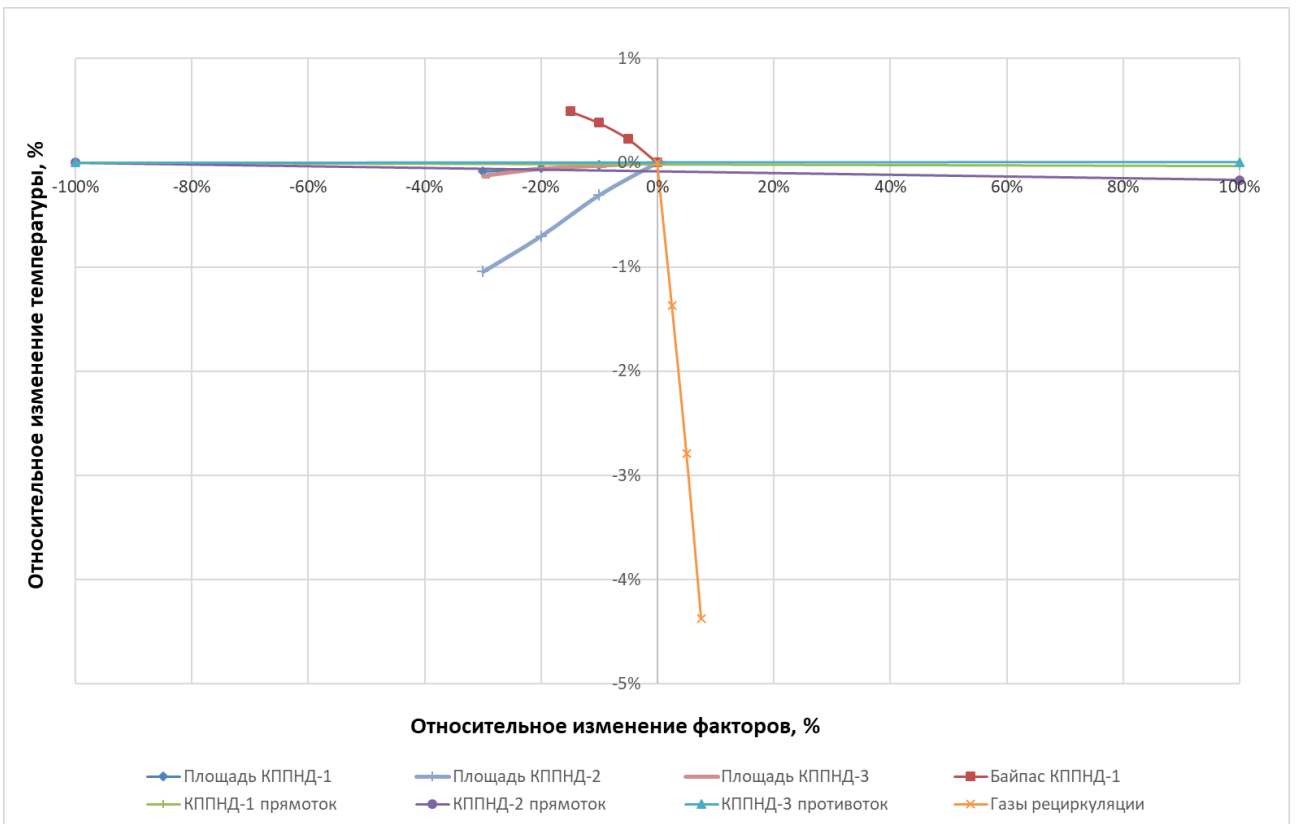


Рисунок 46 – Влияние факторов на температуру вторичного пара

Исходя из графиков чувствительности было составлено 3 варианта обеспечивающих необходимые параметры (см. таблицу 5).

Таблица 5 – Варианты реконструкции

Изменение фактора	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Расход в КПП НД-1	+12%	+12%	+12%
Площадь КПП НД-1	-25%	-25%	-25%
Площадь КПП НД-2	Без изменений	Без изменений	-5,5%
Площадь КПП НД-3	-10%	Без изменений	Без изменений
Газы рециркуляции	+0,4%	+0,1%	Без изменений
КПП НД-2 прямоток	Без изменений	Изменение на прямоток	Без изменений
Изменение температур	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
$t''_{\text{КПП НД-1}}$	488,5	488,8	488,7
$t_{\text{пе}}$	545	545,3	545
$t_{\text{вт}}$	545	544,9	544,9

3.2 Расчет температуры стенки для вариантов

Для выбора оптимального варианта произведем расчет температуры стенки для 3-х вариантов.

Расчет температуры стенки будет производиться для точки с максимальной температурой пара (см. рисунок 47).

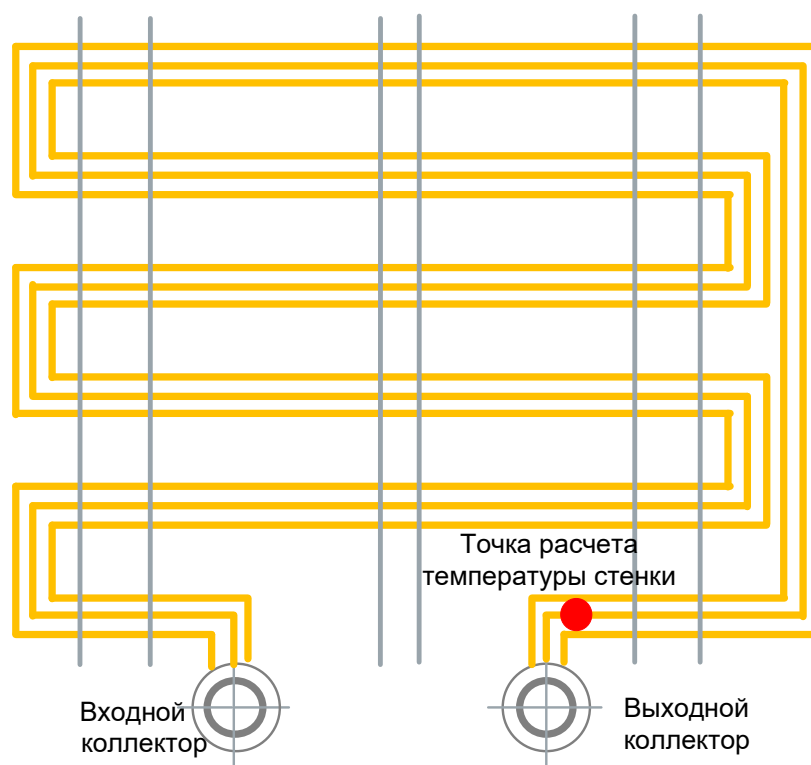


Рисунок 47 – Место расчета температуры стенки

Для пароперегревательных поверхностей нагрева в зоне высоких температур газов (выше 650°C) и поверхностей промежуточных

пароперегревателей, экранных поверхностей прямоточных котлов СКД максимальная температура стенки трубы определяется по следующей формуле:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{п}}^{\text{макс}} + \mu \cdot \beta \cdot q_{\text{макс}} \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{\delta}{\lambda_{\text{м}}} \cdot \frac{1}{1 + \beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \quad (3.1)$$

где $t_{\text{ст}}^{\text{макс}}$ – максимальная расчетная температура пара с учетом неравномерности тепловосприятости по ширине газохода, °С;

$q_{\text{макс}}$ – максимальное тепловосприятие рабочей среды в расчетном месте трубы, кВт/м²;

$\beta = d / d_{\text{вн}}$ – конструктивный коэффициент, характеризующий отношение наружного диаметра трубы к внутреннему;

μ – коэффициент растечки тепла по периметру трубы в силу неравномерности ее обогрева;

δ – толщина стенки трубы, м;

$\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности металла, Вт / (м · К);

α_2 – локальный коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочей среде (пару, воде), Вт / (м² · К).

Максимальное местное тепловое напряжение радиационно-конвективных поверхностей нагрева, включая ширмы на выходе из топки, находят по формуле, кВт/м²:

$$q_{\text{макс}} = \eta_{\text{ш}}^{\text{к}} \cdot q_{\text{р}}, \quad (3.2)$$

где $\eta_{\text{ш}}^{\text{к}}$ – коэффициент неравномерности тепловосприятости по ширине газохода, принимается 1,2;

$q_{\text{р}}$ – тепловосприятие поверхности в расчетном месте, кВт/м², определяется по формуле: $q_{\text{р}} = k_{\text{р}} \cdot \Delta t_{\text{р}}$,

где $\Delta t_{\text{р}}$ – значение температурного напора для расчетного места, °С;

$k_{\text{р}}$ – коэффициент теплопередачи в расчетном месте, кВт/(м² · К), принимаемый равным $1,05 \cdot k$;

здесь k – коэффициент теплопередачи для ПП;

1,05 – коэффициент, учитывающий повышение теплообмена за счет излучения газового объема.

Коэффициент растечки тепла:

$$\mu = 0,95 \cdot \left(\frac{1,6}{\beta} \right)^{0,15} \quad (3.3)$$

Локальный коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочей среде, кВт/(м² · К):

$$\alpha_2 = 0,023 \cdot \frac{\lambda}{d_3} \cdot \left(\frac{\omega \cdot d_3}{\nu} \right)^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \cdot C_t \cdot C_d \cdot C_l, \quad (3.4)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м · К), рассчитывается как функция от давления и температуры $\lambda(p, t)$;

Pr – число Прандтля, рассчитывается как функция от давления и температуры $\text{Pr}(p, t)$;

ν – кинематическая вязкость, рассчитывается как функция от давления и температуры $\nu(p, t)$;

d_3 – эквивалентный диаметр, м, принимается равным внутреннему диаметру $d_{\text{вн}}$;

ω – скорость пара в ПП, м/с;

C_t – поправка, учитывает влияние температурного фактора и зависит от температуры потока, принимается равным 1;

C_d – поправка на форму канала, принимается равным 1;

C_l – поправка на относительную длину, учитывается только для котельных пучков, для ширм, принимается равным 1.

Расчет температуры стенки сводится в таблицу 6.

Таблица 6 – Расчет температуры стенки

Исходные данные	Формула/ Обозначение	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Давление пара в конце КПП НД-1, МПа	p''	2,66	2,66	2,66
Температура пара максимальная, °С	$t_{\text{п}}^{\text{макс}}$	488,5	488,8	488,7
Температура газов на выходе из ПП, °С	ϑ''	603,9	604,7	604,7
Локальный температурный напор, °С	$\vartheta'' - t_{\text{п}}^{\text{макс}}$	115,4	115,9	116
Коэффициент теплопередачи, кВт/(м ² · К)	k	74,61	74,44	74,48
Расход пара, кг/с	$D_{\text{п}}$	17,63	17,63	17,63

Продолжение таблицы 6

Исходные данные	Формула/ Обозначение	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Диаметр трубы наружный, м	d_n	0,042	0,042	0,042
Диаметр трубы внутренний, м	$d_{вн}$	0,034	0,034	0,034
Толщина стенки, м	δ	0,004	0,004	0,004
Теплопроводность стали, Вт/(м·К)	λ_m	37	37	37
Рассчитанные данные	Формула	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Максимальное местное тепловое напряжение, кВт/м ²	(3.2)	10,849	10,871	10,877
Коэффициент растечки тепла	(3.3)	0,988	0,988	0,988
Теплопроводность пара, Вт/(м·К)	$\lambda(p, t)$	0,067	0,067	0,067
Число Прандтля	$Pr(p, t)$	0,933	0,933	0,933
Кинематическая вязкость, м ² /с	$\nu(p, t)$	$3,64 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$
Локальный коэффициент теплоотдачи, кВт/(м ² ·К)	(3.4)	510,18	510,26	510,23
Температура стенки, °С	(3.1)	515	515,4	515,3

3.3 Выбор оптимального варианта

Исходя из расчета температуры стенки оптимальным вариантом будет первый вариант (см. рисунок 48). При прочих равных условиях для КПП НД-1 температура стенки у первого варианта получилась меньше.

Реконструкция КПП НД-1 подразумевает уменьшение поверхности на 25% путем отглушения или удаления пакетов равномерно по ширине газохода. Таким образом удаляются каждый 4-ый пакет, удаляемые пакеты показаны оранжевым цветом (см. рисунок 49). Уменьшение поверхности КПП НД-3 осуществляется таким же способом, равномерно по ширине газохода удаляется каждый 10-ый пакет (см. рисунок 50).

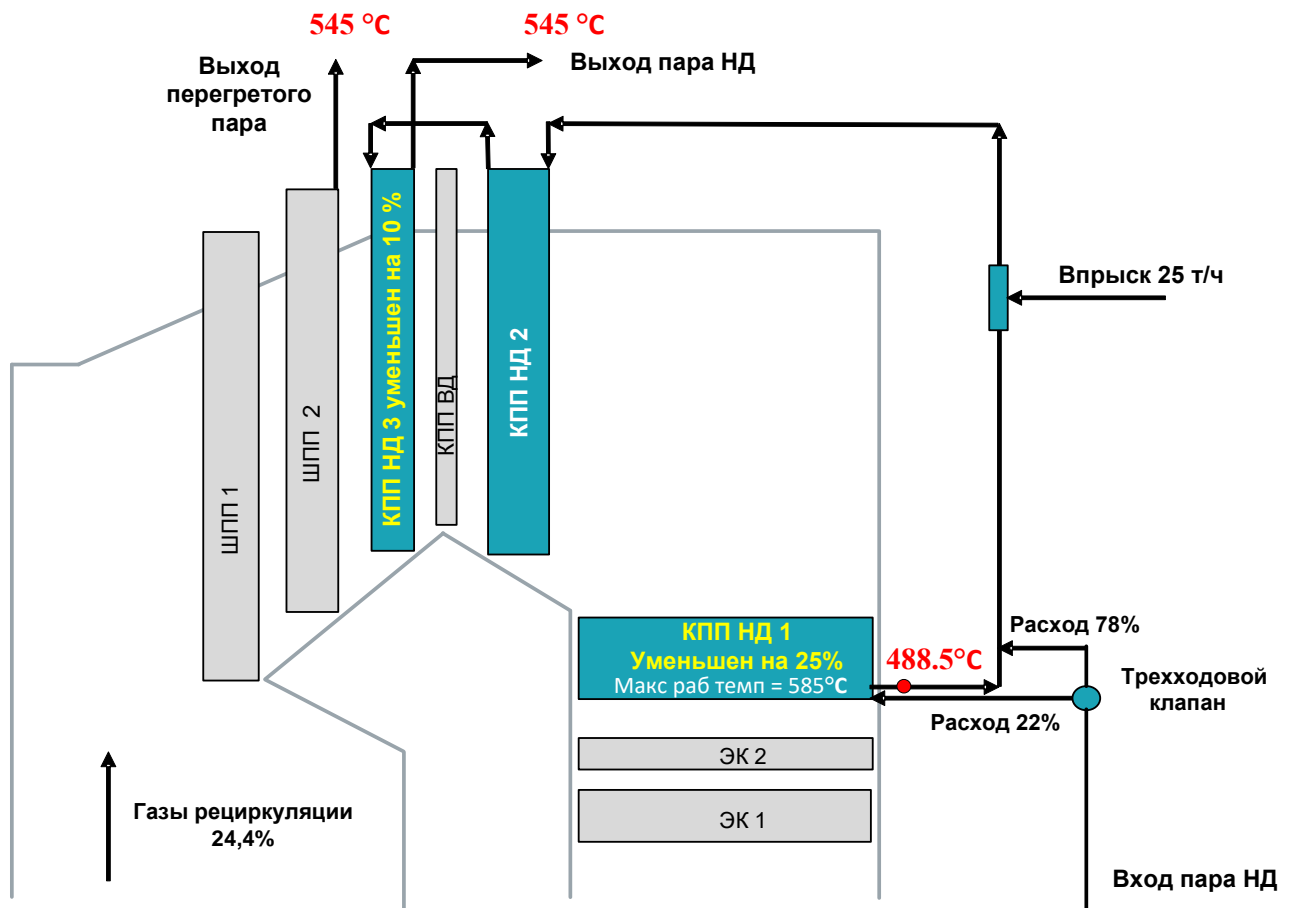


Рисунок 48 – Оптимальный вариант реконструкции

Для аэродинамического расчета произведем расчет увеличившегося усредненного поперечного шага для КПП НД-1, мм:

$$s_1^{\text{НД-1 рек}} = s_1^{\text{НД-1}} \cdot \frac{z_1^{\text{до}}}{z_1^{\text{после}}} = 138 \cdot \frac{60}{45} = 184 \quad (3.5)$$

Для КПП НД-3, мм:

$$s_1^{\text{НД-3 рек}} = s_1^{\text{НД-3}} \cdot \frac{z_1^{\text{до}}}{z_1^{\text{после}}} = 260 \cdot \frac{50}{45} = 288,9 \quad (3.6)$$

где $z_1^{\text{до}}$ – число пакетов до реконструкции;

$z_1^{\text{после}}$ – число пакетов после реконструкции;

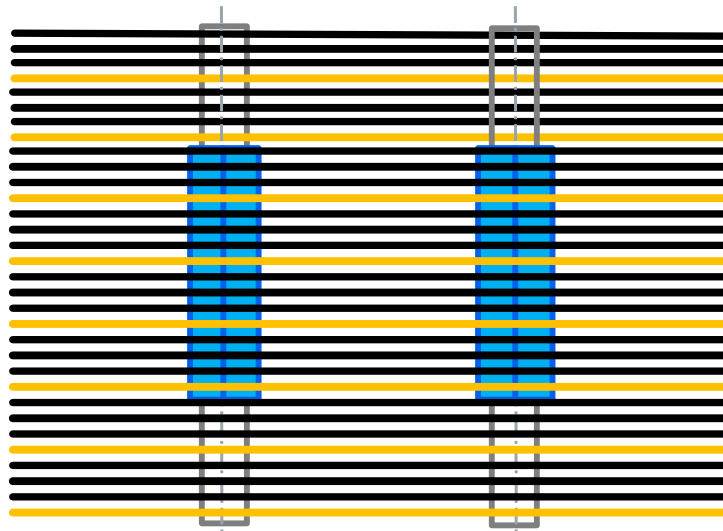


Рисунок 49 – Реконструкция КПП НД-1

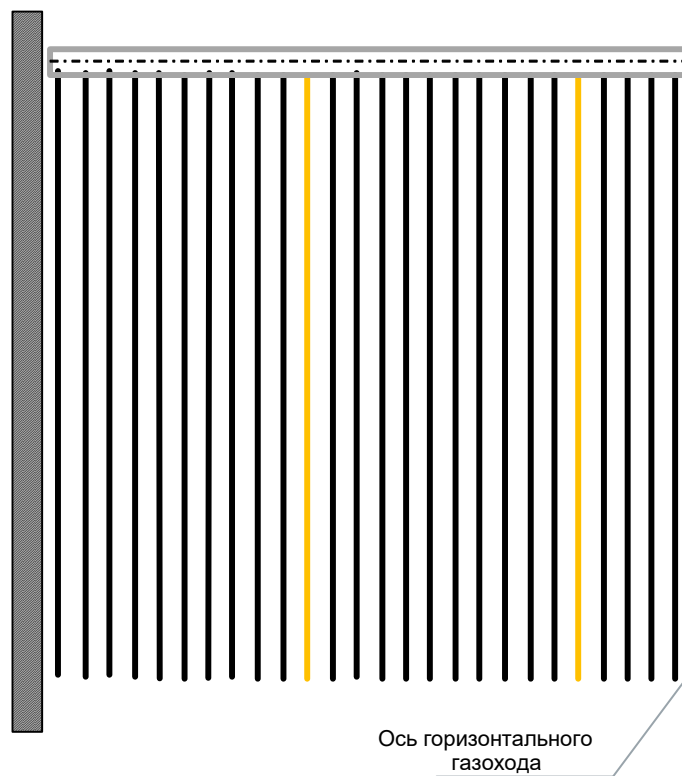


Рисунок 50 – Реконструкция КПП НД-3

Данные теплового расчета для оптимального варианта представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Данные теплового расчета для оптимального варианта

Наименование	Обозначение	Значение
Число итераций	$i_{итер}$	35
Расход перегретого пара, т/ч	$D_{пе}$	670
Расход вторичного пара, т/ч	$D_{вт}$	601,9
Расчетный расход топлива, т/ч	B_r	136,17
Коэффициент сохранения тепла	ϕ	0,997
Потеря уходящими газами, %	q_2	6,506
Потеря с хим. недожогом, %	q_3	0
Потеря с мех. недожогом, %	q_4	0,5
Потеря от наружного охлаждения, %	q_5	0,25
Потеря теплоты с физическим теплом шлака, %	q_6	0,036
КПД, %	η_k	92,707
Теплота внешнего подогрева воздуха, кДж/кг	$Q_{внш}$	213,821
Абсолютная величина невязки	ΔQ	4,98
Относительная величина невязки, %	δQ	0,032
		Топка
Адиабатная температура газа, °С	ϑ_a	1426
Температура газа на выходе из топки, °С	ϑ''	1041,8
Полезное тепловыделение в топочной камере, кДж/кг	Q_r	17695,4
Энтальпия газа на выходе из топки, кДж/кг	H''	12826
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,633
Коэффициент рециркуляции	r	0,244

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение				
		Полочный	Бок ПК	Нижн ГГ	Бок ГГ	Топка
Критерий Бугера	$B_{и}$					1,796
Критерий М	M					0,499
Воспринятое тепло, кДж/кг	$Q_{л}$					4856,3
Среднее теплонапряжение экранов топки, кВт/м ²	$q_{л}$					94,747
Теплота излучения из топки, кДж/кг	$Q_{л\text{ вых}}$					543,88
Параметр забалластированности	r_{ν}					1,871
Избыток горячего воздуха на входе в топку	$\alpha_{гор}$					1,1
Избыток воздуха на выходе из топки	α''					1,2
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	2575,37	2716,5	2716,5	2612,5	2727,5
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	2716,5	2821	2612,43	2658,6	2931
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	349,6	362,86	349,6	351,7	366
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	362,86	376,6	351,7	355,1	396
Давление пара на входе, бар	p'	164,7	141,7	164,7	162,9	161,9
Давление пара на выходе, бар	p''	163,9	163,9	162,9	161,9	159,3
Расход пара, кг/с	$D_{п}$	41,665	41,665	46,533	46,533	88,198

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение					
		Л РПП-Потолочный	Л РПП-Бок ПК	Л РПП-Нижн ГГ	Л РПП-Бок ГГ	Л РПП-Топка	
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	2575,37	2716,5	2575,37	2612,5	2727,5	
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	2716,5	2821	2612,43	2658,6	2931	
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	349,6	362,86	349,6	351,7	366	
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	362,86	376,6	351,7	355,1	396	
Давление пара на входе, бар	p'	164,7	141,7	164,7	162,9	161,9	
Давление пара на выходе, бар	p''	163,9	163,9	162,9	161,9	159,3	
Расход пара, кг/с	$D_{п}$	41,665	41,665	46,533	46,533	88,198	
		ШПП-1КР Левый	ШПП-1СР Левый	ШПП-2КР Левый	ШПП-2СР Левый		
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	3148	3039	3358,2	3283,1	3283,1	
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	3283,1	3185,3	3445,5	3371	3371	
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	448,8	420,5	514,4	490,2	490,2	
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	490,2	460,4	545	519,1	519,1	
Энтальпия газа на входе в ПШ, кДж/кг	H'	12825,95	12825,95	11619,57	11543,5	11543,5	
Энтальпия газа на выходе из ПШ, кДж/кг	H''	11619,57	11543,5	10776,5	10700	10700	
Температура газа на входе в ПШ, °С	g'	1041,8	1041,8	953,1	947,5	947,5	

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение			
		ШПП-1КР Левый	ШПП-1СР Левый	ШПП-2КР Левый	ШПП-2СР Левый
Температура газа на выходе из ПШ, °С	g''	953,1	947,5	886,6	881
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	44,6	44,4	42,35	42,1
Температурный напор, °С	Δt	525,2	551,5	388,16	407,7
Скорость газов, м/с	ω_r	3,256	3,25	3,387	3,37
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,633	7,633	7,633	7,633
Давление пара на входе, бар	p'	153,5	157,7	143,9	148,7
Давление пара на выходе, бар	p''	148,7	153,5	140	143,9
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^o	1203,1	1279	840,8	841,3
Расход топлива, кг/с	B_r	9,459	9,459	9,459	9,459
Расход пара, кг/с	$D_{п}$	92,361	90,141	93,055	92,361
Лучистое тепло, кДж/кг	Q''	115,575	115,57	17,34	17,34
Избыток воздуха на входе в ПШ	α'	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ПШ	α''	1,2	1,2	1,2	1,2
		ШПП-1КР Правый	ШПП-1СР Правый	ШПП-2КР Правый	ШПП-2СР Правый
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	3148	3039	3358,2	3283,1
Энтальпия пара на выходе из ПШ, кДж/кг	h''	3283,1	3185,3	3445,5	3371
Температура пара на входе в ПШ, °С	t'	448,8	420,5	514,4	490,2
Температура пара на выходе из ПШ, °С	t''	490,2	460,4	545	519,1

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение				
		ШПП-1КР Правый	ШПП-1СР Правый	ШПП-2КР Правый	ШПП-2СР Правый	ШПП-2СР Правый
Энтальпия газа на входе в ПШ, кДж/кг	H'	12825,95	12825,95	11619,57	11619,57	11543,5
Энтальпия газа на выходе из ПШ, кДж/кг	H''	11619,57	11543,5	10776,5	10776,5	10700
Температура газа на входе в ПШ, °С	g'	1041,8	1041,8	953,1	953,1	947,5
Температура газа на выходе из ПШ, °С	g''	953,1	947,5	886,6	886,6	881
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	44,6	44,4	42,35	42,35	42,1
Температурный напор, °С	Δt	525,2	551,5	388,16	388,16	407,7
Скорость газов, м/с	ω_r	3,256	3,25	3,387	3,387	3,37
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,633	7,633	7,633	7,633	7,633
Давление пара на входе, бар	p'	153,5	157,7	143,9	143,9	148,7
Давление пара на выходе, бар	p''	148,7	153,5	140	140	143,9
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	1203,1	1279	840,8	840,8	841,3
Расход топлива, кг/с	B_r	9,459	9,459	9,459	9,459	9,459
Расход пара, кг/с	D_n	92,361	90,141	93,055	93,055	92,361
Лучистое тепло, кДж/кг	Q^n	115,575	115,57	17,34	17,34	17,34
Избыток воздуха на входе в ПШ	α'	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ПШ	α''	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый
Энтальпия пара на входе в ПШ, кДж/кг	h'	3406,7	2903,5	3068,8	3086,8	3086,8

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение				
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый
Энтальпия пара на выходе из ПП, кДж/кг	h''	3561,7	3039	3406,7	3434,5	3434,5
Температура пара на входе в ПП, °С	t'	475,6	390,4	327,3	335	335
Температура пара на выходе из ПП, °С	t''	545	420,5	475,6	488,5	488,5
Энтальпия газа на входе в ПП, кДж/кг	H'	10670,9	9881	9232	7417,2	7417,2
Энтальпия газа на выходе из ПП, кДж/кг	H''	9987,2	9232	7734,8	7092,2	7092,2
Температура газа на входе в ПП, °С	g'	878,8	819,7	770,5	629,6	629,6
Температура газа на выходе из ПП, °С	g''	827,7	770,5	654,6	603,9	603,9
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	54,7	68,53	59,2	74,6	74,6
Температурный напор, °С	Δt	339,3	389,6	310,8	198,2	198,2
Скорость газов, м/с	ω_r	9,608	12,93	10,894	11,2	11,2
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,633	7,633	7,633	7,633	7,633
Давление пара на входе, бар	p'	26,13	159,3	27,23	27,3	27,3
Давление пара на выходе, бар	p''	25,43	157,7	26,13	26,6	26,6
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	681,8	647,25	1493,1	324,1	324,1
Расход топлива, кг/с	B_r	37,838	37,838	37,838	18,919	18,919
Расход пара, кг/с	D_n	167,188	180,281	167,188	17,631	17,631
Лучистое тепло, кДж/кг	Q^n	3,06	0	0	0	0

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение					
		КПП НД-3	КПП ВД-1	КПП НД-2	КПП НД-1 Левый	КПП НД-1 Правый	КПП НД-1 Правый
Избыток воздуха на входе в ПП	α'	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ПП	α''	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Энтальпия воды на входе в ВЭК, кДж/кг	h'	1412	1030,1	1412	1412	1412	1030,1
Энтальпия воды на выходе из ВЭК, кДж/кг	h''	1703,1	1412	1703,1	1703,1	1412	1412
Температура воды на входе в ВЭК, °С	t'	313,2	238	313,2	313,2	238	238
Температура воды на выходе из ВЭК, °С	t''	349,6	313,2	349,6	349,6	313,2	313,2
Энтальпия газа на входе в ВЭК, кДж/кг	H'	7092,2	5656,2	7092,2	7092,2	5656,2	5656,2
Энтальпия газа на выходе из ВЭК, кДж/кг	H''	5656,2	3774	5656,2	5656,2	3774	3774
Температура газа на входе в ВЭК, °С	ϑ'	603,9	488,3	603,9	603,9	488,3	488,3
Температура газа на выходе из ВЭК, °С	ϑ''	488,3	330,6	488,3	488,3	330,6	330,6
Коэффициент теплопередачи, $V_T/(m^2 \cdot K)$	k	92,9	83,4	92,9	92,9	83,4	83,4
Температурный напор, °С	Δt	210,2	129,45	210,2	210,2	129,45	129,45
Скорость газов, м/с	ω_T	9,87	8,24	9,87	9,87	8,24	8,24
Объем газов, м ³ /кг	V_T	7,633	7,649	7,633	7,633	7,649	7,649
Давление воды на входе, бар	p'	166	167	166	166	167	167
Давление воды на выходе, бар	p''	164,7	166	164,7	164,7	166	166

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение			
		ВЭК-2 Левый	ВЭК-1 Левый	ВЭК-2 Правый	ВЭК-1 Правый
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^o	1432,14	1878,5	1432,14	1878,5
Расход топлива, кг/с	B_r	18,919	18,919	18,919	18,919
Расход воды, кг/с	G_B	93,055	93,055	93,055	93,055
Лучистое тепло, кДж/кг	$Q^{\text{л}}$	0	0	0	0
Степень сухости на входе	x'	0	0	0	0
Степень сухости на выходе	x''	0,037	0	0,037	0
Избыток воздуха на входе в ВЭК	α'	1,2	1,2	1,2	1,2
Избыток воздуха на выходе из ВЭК	α''	1,2	1,208	1,2	1,208
		ВЗП-1 Левый		ВЗП-1 Правый	
Энтальпия воздуха на входе в ВЗП, кДж/кг	h'		353,84		353,84
Энтальпия воздуха на выходе из ВЗП, кДж/кг	h''		1833,7		1833,7
Температура воздуха на входе в ВЗП, °С	t'		65		65
Температура воздуха на выходе из ВЗП, °С	t''		328,3		328,3
Энтальпия газа на входе в ВЗП, кДж/кг	H'		3774		3774
Энтальпия газа на выходе из ВЗП, кДж/кг	H''		2148,24		2148,24
Температура газа на входе в ВЗП, °С	ϑ'		330,6		330,6
Температура газа на выходе из ВЗП, °С	ϑ''		189,5		189,5

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение	
		ВЗП-1 Левый	ВЗП-1 Правый
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	26,84	26,84
Температурный напор, °С	Δt	30,5	30,5
Скорость газов, м/с	ω_r	13,2	13,2
Скорость воздуха, м/с	ω_b	6,6	6,6
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,706	7,706
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	1641,95	1641,95
Расход топлива, кг/с	B_r	18,919	18,919
Лучистое тепло, кДж/кг	$Q^{\text{л}}$	0	0
Избыток воздуха на входе в ВЗП	α'	1,208	1,208
Избыток воздуха на выходе из ВЗП	α''	1,227	1,227
		ВЭК НД-1 Левый	ВЭК НД-1 Правый
Энтальпия воды на входе в ВЭК, кДж/кг	h'	395,4	395,4
Энтальпия воды на выходе из ВЭК, кДж/кг	h''	549,2	549,2
Температура воды на входе в ВЭК, °С	t'	94	94
Температура воды на выходе из ВЭК, °С	t''	130,5	130,5
Энтальпия газа на входе в ВЭК, кДж/кг	H'	2148,24	2148,24
Энтальпия газа на выходе из ВЭК, кДж/кг	H''	1588,2	1588,2
Температура газа на входе в ВЭК, °С	ϑ'	189,5	189,5

Продолжение таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение						
		ВЭК НД-1 Левый	ВЭК НД-1 Правый	Л ВПР-1	П ВПР-2	П ВПР-3	Л ВПР-2	Л ВПР-3
Температура газа на выходе из ВЭК, °С	g''	140,2	140,2					
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	k	54,2	54,2					
Температурный напор, °С	Δt	52,35	52,35					
Скорость газов, м/с	ω_r	4,21	4,21					
Объем газов, м ³ /кг	V_r	7,77	7,77					
Давление воды на входе, бар	p'	17,14	17,14					
Давление воды на выходе, бар	p''	16	16					
Балансовое тепло, кДж/кг	Q^b	560,3	560,3					
Расход топлива, кг/с	B_r	18,919	18,919					
Расход воды, кг/с	G_b	68,75	68,75					
Лучистое тепло, кДж/кг	Q''	0	0					
Степень сухости на входе	x'	0	0					
Степень сухости на выходе	x''	0	0					
Избыток воздуха на входе в ВЭК	α'	1,227	1,227					
Избыток воздуха на выходе из ВЭК	α''	1,238	1,238					
	СторВПР	П ВПР-1	П ВПР-2	П ВПР-3	Л ВПР-1	Л ВПР-2	Л ВПР-3	
Энтальпия пара на входе во ПО, кДж/кг	h'	3163,3	2931	3185,3	2931	3185,3	3371	3371
Энтальпия пара на выходе из ПО, кДж/кг	h''	3068,8	2903,1	3148	2903,1	3148	3358,2	3358,2
Температура пара на входе в ПО, °С	t'	367,7	396	460,3	396	460,3	519	519

Окончание таблицы 7

Наименование	Обозначение	Значение						
		СторВПР	П ВПР-1	П ВПР-2	П ВПР-3	Л ВПР-1	Л ВПР-2	Л ВПР-3
Температура пара на выходе из ПО, °С	t''	327,3	390,4	448,8	514,4	390,4	448,8	514,4
Расход конденсата на впрыск, кг/с	$G_{\text{впр}}$	6,91	1,943	2,221	0,694	1,943	2,221	0,694
Расход пара, кг/с	$D_{\text{п}}$	167,2	90,141	92,361	93,055	90,141	92,361	93,055

На рисунке 51 представлен график распределения температур по трактам для оптимального варианта

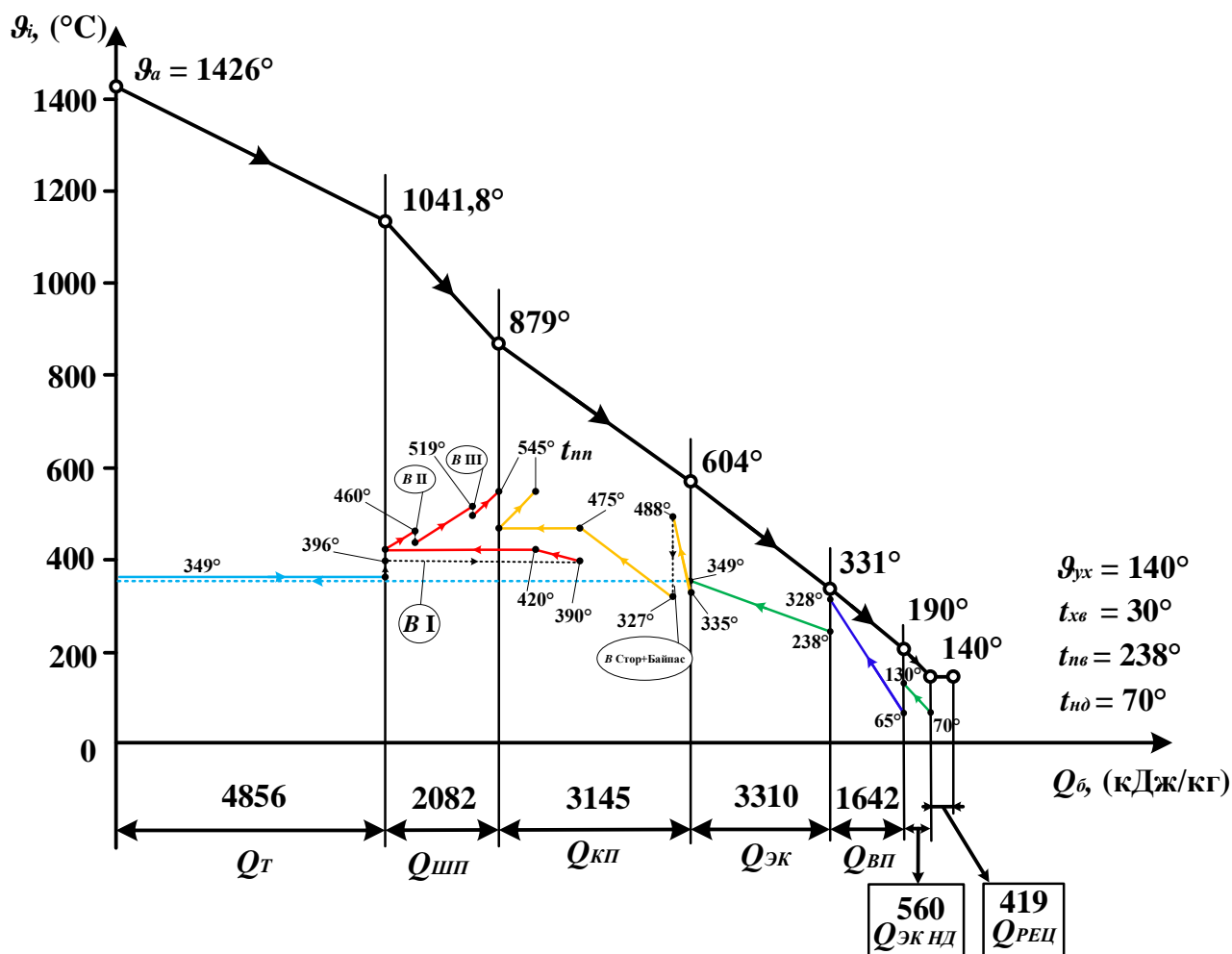


Рисунок 51 – График распределения температур по трактам

3.4 Аэродинамический расчет

Т.к. в ходе реконструкции была изменена нагревательная поверхность КПП НД-1 и КПП НД-3, следует проверить применимость работы дымососов после реконструкции в новых условиях работы, а также оценить изменение доли собственных нужд на работу дымососов для экономического анализа реконструкции.

Аэродинамический расчет газовоздушного тракта выполняется по данным теплового расчета для номинальной нагрузки котельного агрегата с помощью соответствующего учебного пособия [3]. Из теплового расчета котла составляется таблица исходных данных, необходимых для выполнения аэродинамического расчета (см. таблицу 8).

Таблица 8 – Исходные данные для выполнения аэродинамического расчета

Участок тракта	Диаметр труб, d, мм	z2, шт	Отношение шага труб к диаметру		Длина продольно оmyаемых труб, м	Средняя температура газов ϑ_{cp} , °C	Средняя скорость газов, ω_r , м/с
			$\frac{s_1}{d}$	$\frac{s_2}{d}$			
ШПП-1	38	60	8,66	0,683	-	997	3,26
ШПП-2	38	60	8,66	0,683	-	920	3,26
КПП НД-3	60	12	4,82	1,5	-	853	9,608
КПП ВД-1	42	8	3,09	1,55	-	795	12,93
КПП НД-2	50	24	2,6	1,6	-	712	10,89
КПП НД-1	42	36	4,38	1,61	-	616	11,21
ВЭК-2	28	24	4,29	1,61	-	546	9,87
ВЭК-1	28	48	4,29	1,61	-	409	8,24
ВЗП-1	37	77	1,5	1,05	14,8	260	13,2
ВЭК НД	28	32	3,57	1,61	-	165	4,21

Расчет представлен в таблице 9.

Таблица 9 – Аэродинамический расчет газового тракта после реконструкции

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Сопrotивление ШПП-1 (Учитывается при скоростях газов, больших 10 м/с)			
Сопrotивление продольно-омываемого пучка труб, Па	$\Delta h_{шпп-1}$	$\lambda \frac{l}{d_3} h_d$	0
Сопrotивление ШПП-2 (Учитывается при скоростях газов, больших 10 м/с)			
Сопrotивление продольно-омываемого пучка труб, Па	$\Delta h_{шпп-1}$	$\lambda \frac{l}{d_3} h_d$	0
Сопrotивление КПП НД-3			
Параметр ψ	ψ	$\frac{s_1 - d}{s_2 - d}$	7,52
Коэф-т сопротивления коридорных гладкотрубных пучков при поперечном омывании	$\xi_{гр}$	Рисунок 4 [3]	0,48
Поправочный коэф-т C_σ	C_σ	Рисунок 5 [3, с.11]	0,46
Поправочный коэф-т C_{Re}	C_{Re}	Рисунок 5 [3, с.11]	0,34

Продолжение таблицы 9

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Сопrotивление КПП НД-3			
Коэф-т сопротивления отнесенный к одному ряду пучка	ζ_0	$\zeta_{гр} \cdot C_{\sigma} \cdot C_{Re}$	0,075
Коэф-т сопротивления	ζ	$\zeta_0 \cdot z_2 \cdot 6$	5,405
Динамическое давление, Па	h_d	Рисунок 3 [3]	15
Сопrotивление коридорного пучка, Па	Δh	$\zeta \cdot h_d$	81,08
Сопrotивление КПП ВД-1			
Параметр ψ	ψ	$\frac{s_1 - d}{s_2 - d}$	3,826
Коэф-т сопротивления коридорных гладкотрубных пучков при поперечном омывании	$\zeta_{гр}$	Рисунок 4 [3]	0,48
Поправочный коэф-т C_{σ}	C_{σ}	Рисунок 5 [3, с.11]	0,57
Поправочный коэф-т C_{Re}	C_{Re}	Рисунок 5 [3, с.11]	0,49
Коэф-т сопротивления отнесенный к одному ряду пучка	ζ_0	$\zeta_{гр} \cdot C_{\sigma} \cdot C_{Re}$	0,134
Коэф-т сопротивления	ζ	$\zeta_0 \cdot z_2 \cdot 4$	4,29
Динамическое давление, Па	h_d	Рисунок 3 [3]	28
Сопrotивление коридорного пучка, Па	Δh	$\zeta \cdot h_d$	120,12
Сопrotивление КПП НД-2			
Параметр ψ	ψ	$\frac{s_1 - d}{s_2 - d}$	2,667
Коэф-т сопротивления коридорных гладкотрубных пучков при поперечном омывании	$\zeta_{гр}$	Рисунок 4 [3]	0,465

Продолжение таблицы 9

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Сопrotивление КПП НД-2			
Поправочный коэф-т C_{σ}	C_{σ}	Рисунок 5 [3, с.11]	0,62
Поправочный коэф-т C_{Re}	C_{Re}	Рисунок 5 [3, с.11]	0,54
Коэф-т сопротивления отнесенный к одному ряду пучка	ξ_0	$\xi_{гр} \cdot C_{\sigma} \cdot C_{Re}$	0,156
Коэф-т сопротивления	ξ	$\xi_0 \cdot z_2 \cdot 6$	22,418
Динамическое давление, Па	h_d	Рисунок 3 [3]	23
Сопrotивление коридорного пучка, Па	Δh	$\xi \cdot h_d$	515,562
Сопrotивление КПП НД-1			
Динамическое давление, Па	h_d	Рисунок 3 [3]	26
Коэффициент сопротивления одного ряда труб	$\xi_{0шир}$	Рисунок 6 [3]	0,24
Сопrotивление шахматного пучка, Па	Δh	$\Delta h = \xi_{0шир} \cdot h_d \cdot (z_2 + 1)$	230,88
Сопrotивление ВЭК-2			
Динамическое давление, Па	h_d	Рисунок 3 [3]	22,5
Коэффициент сопротивления одного ряда труб	$\xi_{0шир}$	Рисунок 6 [3]	0,22
Сопrotивление шахматного пучка, Па	Δh	$\Delta h = \xi_{0шир} \cdot h_d \cdot (z_2 + 1)$	123,75
Сопrotивление ВЭК-1			
Динамическое давление, Па	h_d	Рисунок 3 [3]	17,5
Коэффициент сопротивления одного ряда труб	$\xi_{0шир}$	Рисунок 6 [3]	0,22
Сопrotивление шахматного пучка, Па	Δh	$\Delta h = \xi_{0шир} \cdot h_d \cdot (z_2 + 1)$	188,65
Сопrotивление ВЗП-1			
Отношение совокупного сечения труб к площади живого сечения	$\frac{F_M}{F_0}$	$\frac{0,785 \cdot d_{вн}^2}{s_1 \cdot s_2}$	0,426

Продолжение таблицы 9

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Сопrotивление ВЗП-1			
Коэф-т $C_{ш}$	$C_{ш}$	Рисунок 8 [3]	1
Уменьшение напора в трубках ТВП, Па/м	$\Delta h'_{тр}$	Рисунок 8 [3]	58
Полная высота ВЗП, м	$h_{взп}$	Таблица 8	14,8
Сопrotивления трения, Па	$\Delta h_{тр}$	$C_{ш} \cdot \Delta h'_{тр} \cdot h_{взп}$	858,4
Число кубов по ходу газов	m	Рисунок 4	4
Коэф-т сопротивления на входе	$\xi_{вх}$	Рисунок 9 [3]	0,28
Коэф-т сопротивления на выходе	$\xi_{вых}$	Рисунок 9 [3]	0,35
Динамическое давление, Па	$h_{д}$	Рисунок 3 [3]	59
Сопrotивление из-за изменений скорости при входе и выходе из ВЗП, Па	$\Delta h_{изм}$	$m \cdot (\xi_{вх} + \xi_{вых}) \cdot h_{д}$	148,7
Суммарное сопротивление ВЗП, Па	$\Delta h_{взп}$	$\Delta h_{тр} + \Delta h_{изм}$	1007
Сопrotивление ВЭК-НД			
Динамическое давление, Па	$h_{д}$	Рисунок 3 [3]	7,4
Коэффициент сопротивления одного ряда труб	$\xi_{0шпр}$	Рисунок 6 [3]	0,28
Сопrotивление шахматного пучка, Па	Δh	$\Delta h = \xi_{0шпр} \cdot h_{д} \cdot (z_2 + 1)$	68,38
Сопrotивление газозодов			
Сопrotивление 1-ого поворота, Па	$\Delta h_{м1}$	$\xi_{м1} \cdot h_{д1}$	24
Сопrotивление 2-ого поворота, Па	$\Delta h_{м2}$	$\xi_{м2} \cdot h_{д2}$	70
Сопrotивление 3-ого поворота, Па	$\Delta h_{м3}$	$\xi_{м3} \cdot h_{д3}$	35
Сопrotивление 4-ого поворота, Па	$\Delta h_{м4}$	$\xi_{м4} \cdot h_{д4}$	35
Сопrotивление входа в дымовую трубу, Па	$\Delta h_{м}^{д.т.}$	$\xi_{м вх} \cdot h_{д дт}$	98

Продолжение таблицы 9

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Сопротивление газопроводов			
Местное сопротивление топка-золоуловитель, Па	$\Delta h_M^{т-з.у.}$	$\Delta h_{M1} + \Delta h_{M2}$	84
Местное сопротивление золоуловитель-дымовая труба, Па	$\Delta h_M^{з.у.-д.т.}$	$\Delta h_{M3} + \Delta h_{M4} + \Delta h_M^{д.т.}$	114
Сопротивление трения			
Длина участка котел-золоуловитель, м	$l^{к-з.у.}$	$\frac{D_{пе}}{(1,28 + 0,0083 \cdot D_{пе})}$	65,887
Длина участка золоуловитель-дымовая труба, м	$l^{з.у.-д.т.}$	$\frac{D_{пе}}{(1 + 0,007 \cdot D_{пе})}$	80,82
Сопротивление трения участка котел-золоуловитель, Па	$\Delta h_{тр}^{к-з.у.}$	$\lambda \cdot \frac{l^{к-з.у.}}{d_3} \cdot h_d^{к-з.у.}$	59,3
Сопротивление трения участка золоуловитель-дымовая труба, Па	$\Delta h_{тр}^{з.у.-д.т.}$	$\lambda \cdot \frac{l^{з.у.-д.т.}}{d_3} \cdot h_d^{з.у.-д.т.}$	72,7
Суммарное сопротивление газового тракта, Па	$\Delta h_{тр}^{сумм}$	$\Delta h_{тр}^{к-з.у.} + \Delta h_{тр}^{з.у.-д.т.}$	132,03
Гидравлическое сопротивление золоуловителя			
Электрофильтр ЭСГ	$\Delta h_{з\у}$	-	175
Сопротивление дымовой трубы			
Температура газов перед дымососом, °С	ϑ_d	$\frac{\alpha_{yx} \cdot \vartheta_{yx} + \Delta\alpha \cdot t_{хв}}{\alpha_{yx} + \Delta\alpha}$	135,7
Расход дымовых газов через трубу, м ³ /с	$V_{трб}$	$4 \cdot B_p \cdot (V_r + \Delta\alpha \cdot V_B^0) \cdot \frac{\vartheta_d + 273}{273}$	1384
Внутренний диаметр трубы на входе, м	d_0	$0,01898 \cdot \sqrt{\frac{V_{трб} \cdot 3600}{\omega_0}}$	10,18
Скорость газов в выходном сечении трубы	ω_0	[3, стр. 30]	17
При постоянном уклоне в трубе сопротивление трения, Па	$\Delta h_{тр}$	$\frac{\lambda}{8 \cdot i} \cdot h_d$	16,25

Продолжение таблицы 9

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Сопrotивление дымовой трубы			
Потеря давления с выходной скоростью, Па	$\Delta h_{\text{ВЫХ}}$	$\xi_{\text{ВЫХ}} \cdot h_{\text{д}}$	130
Суммарное сопротивление дымовой трубы, Па	$\Delta h_{\text{ДТ}}$	$\Delta h_{\text{ТР}} + \Delta h_{\text{ВЫХ}}$	146,25
Расчет самотяги			
Высота рассчитываемого участка газохода, м	$H_{\text{КШ}}$	Взято с заводского чертежа	47
Величина самотяги для конвективной шахты, Па	$h_{\text{с}}$	$\pm H_{\text{КШ}} \cdot g \cdot \left(1,23 - \rho_0 \cdot \frac{273}{\vartheta_{\text{Г}} + 273,15} \right)$	-380
Высота дымовой трубы, м	$H_{\text{ДТ}}$	Информация о КТЭЦ-3	275
Величина самотяги для дымовой трубы, Па	$h_{\text{с}}^{\text{КШ}}$	$\pm H_{\text{ДТ}} \cdot g \cdot \left(1,23 - \rho_0 \cdot \frac{273}{\vartheta_{\text{Г}} + 273,15} \right)$	1065,44
Суммарная самотяга котельной установки, Па	$H_{\text{с}}$	$\sum_{i=1}^n h_{\text{с}i}$	685,43
Расчет перепада полных давлений по газовому тракту			
Сумма сопротивлений на участке топка-золоуловитель, Па	$\sum \Delta h_{\text{Т-З.У.}}$	$\Delta h_{\text{ШПП 1+2}} + \Delta h_{\text{КПП ВД}} + \Delta h_{\text{КПП НД 1+2+3}} + \Delta h_{\text{ВЭК 1+2}} + 2 \cdot \Delta h_{\text{ВЭП}} + 2 \cdot \Delta h_{\text{ВЭК НД}} + \Delta h_{\text{М}}^{\text{Т-З.У.}} + \Delta h_{\text{ТР}}^{\text{Т-З.У.}} + \Delta h_{\text{ЗУ}}$	3729,3
Сумма сопротивлений на участке золоуловитель-дымовая труба, Па	$\sum \Delta h_{\text{З.У.-Д.Т.}}$	$\Delta h_{\text{ДТ}} + \Delta h_{\text{ТР}}^{\text{З.У.-Д.Т.}} + \Delta h_{\text{М}}^{\text{З.У.-Д.Т.}}$	363
Суммарное сопротивление газового тракта при уравновешенной тяге, Па	ΔH	$\sum \Delta h_{\text{Т-З.У.}} + \sum \Delta h_{\text{З.У.-Д.Т.}}$	4092,3
Разрежение на выходе из топки	$h_{\text{Т}}''$	[3, п. 1.1.]	30
Перепад полных давлений по газовому тракту, Па	$H_{\text{П}}$	$h_{\text{Т}}'' + \Delta H - H_{\text{с}}$	3376,8
Проверка применимости дымососа ДОД-28,5			
Расчетный напор дымососа, Па	$H_{\text{д}}$	$\beta_2 \cdot H_{\text{П}}$	4052,2
Расход газов при номинальной нагрузке котла, м ³ /с	$V_{\text{д}}$	$V_{\text{п}} \cdot (V_{\text{УХ.Г}} + \Delta \alpha \cdot V_{\text{В}}^0) \cdot \frac{\vartheta_{\text{д}} + 273,15}{273,15}$	346

Окончание таблицы 9

Наименование величины	Обозначение	Расчетная формула	Значение
Проверка применимости дымососа ДОД-28,5			
Производительность дымососа, м ³ /с	Q_p	$\beta_1 \cdot V_d$	380,6
Производительность одного дымососа, м ³ /с (тыс. м ³ /ч)	Q_d	$\frac{Q_p}{2}$	190,3 (685,08)

Исходя из произведенного расчета дымосос ДОД-28,5 отвечает требованиям реконструкции (см. рисунок 52).

Расчетная мощность двигателя дымососа, кВт:

$$N_d = \beta_3 \cdot \frac{Q_d \cdot H_d \cdot 10^{-3}}{\eta_d} = 1,05 \cdot \frac{190,3 \cdot 4052 \cdot 10^{-3}}{0,8} = 1245,6, \quad (3.7)$$

где β_3 – коэф-т запаса по потребляемой мощности, в расчетах принимается 1,05;

Q_d – производительность одного дымососа, м³/с;

H_d – расчетный напор дымососа, Па;

η_d – КПД дымососа.

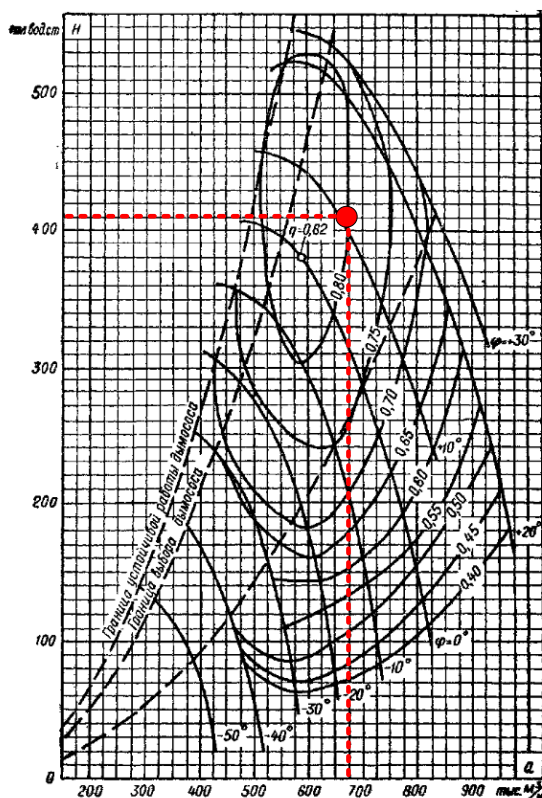


Рисунок 52 – Выбор дымососа

4 Экономическая часть

4.1 Расчет экономии на уменьшении собственных нужд

Уменьшение поверхности реконструированных КПП привело, к увеличению поперечного шага между пакетами, уменьшению сопротивления газового тракта, и как следствие к уменьшению мощности, затрачиваемой дымососами.

Экономия на уменьшении собственных нужд составит, руб./ч:

$$\mathcal{E}_{\text{дс}} = n \cdot (N_{\text{д1}} - N_{\text{д2}}) \cdot C_{\text{э}} = 2 \cdot (1300 - 1245,6) \cdot 1,3 = 141,44, \quad (4.1)$$

где n – количество дымососов;

$N_{\text{д1}} = 1300$ кВт – мощность, затрачиваемая двигателем дымососа до реконструкции;

$N_{\text{д2}}$ – мощность, затрачиваемая двигателем дымососа после реконструкции (см. формулу 3.7);

$$C_{\text{э}} = 1,3 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}} \text{ – себестоимость электроэнергии на КТЭЦ-3.}$$

4.2 Расчет экономии на топливе

Уменьшение затрат на топливо, руб./ч рассчитаем по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{топ}} = C \cdot (B_1 - B_2) = 1700 \cdot (136,22 - 136,17) = 85, \quad (4.2)$$

где C – цена Ирша-Бородинского Б2 угля, руб./т;

B_2 – расход топлива после реконструкции, т/ч (см. таблицу 7);

B_1 – расход топлива до реконструкции, т/ч (см. таблицу 4).

4.3 Расчет увеличения прибыли за счет уменьшения простоя в ремонте

Доход от продажи дополнительной электроэнергии, млн. руб./г:

$$D_{\text{э/э}} = W_{\text{э}} \cdot (T_{\text{до рек}} - T_{\text{после рек}}) \cdot C_{\text{э}} = 204000 \cdot (8148 - 7948) \cdot 1,6 = 65,28 \quad (4.3)$$

где $W_{\text{э}}$ – установленная электрическая мощность, кВт;

$C_{\text{э}}$ – тариф на э/э.

4.4 Годовая экономия

Время работы основного оборудования, ч/год:

$$T_{\text{раб}} = 8760 - T_{\text{рем}} = 8760 - 212 = 8548, \quad (4.4)$$

где 8760 ч/год – число рабочих часов оборудования в году;

$T_{\text{рем}} = 212$ ч/год – время простоя в ремонте.

Число часов использования установленной мощности, ч/год:

$$T_{\text{уст}} = T_{\text{раб}} - T_a = 8548 - 400 = 8148, \quad (4.5)$$

где $T_a = 400$ ч/год – аварийный резерв, ч/год.

Годовая экономия, млн. руб./год:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{год}} &= (\mathcal{E}_{\text{дс}} + \mathcal{E}_{\text{топ}}) \cdot T_{\text{уст}} + D_{\mathcal{E}/\mathcal{E}} = (141,44 + 85) \cdot 8148 \cdot 10^{-6} + 65,28 = \\ &= 67,12 \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.5 Расчет затрат на монтаж

Мероприятие по монтажу КПП НД-1 и КПП НД-3 включают в себя: разбор обмуровки, извлечение ПП, обрезку труб, заглушение отверстий, установку ПП, монтаж обмуровки.

Затраты на монтаж представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Затраты на монтаж

Мероприятие	Стоимость, тыс. руб.
Комплекс мероприятий по монтажу КПП НД-1	26400,45
Комплекс мероприятий по монтажу КПП НД-3	12760,82

4.6 Расчет срока окупаемости

Затраты на капитальные вложения, тыс. руб., для реконструкции составят:

$$K = Z_{\text{КПП НД-1}} + Z_{\text{КПП НД-3}} = 26400,45 + 12760,82 = 39172,7, \quad (4.7)$$

где $Z_{\text{КПП НД-1}}$ – затраты на монтаж КПП НД-1;

$Z_{\text{КПП НД-3}}$ – затраты на монтаж КПП НД-3.

Размер амортизационных отчислений, тыс. руб./год:

$$U_a = H \cdot K = \frac{1}{15} \cdot 39172,7 = 2611,5, \quad (4.8)$$

где $H = \frac{1}{15}$ – средняя норма амортизации;

$K = 39172,7$ – затраты на капитальные вложения, тыс. руб.

Годовой прирост балансовой прибыли, тыс. руб.:

$$\Delta\Pi_6 = \mathcal{E}_{\text{год}} - U_a = 67120 - 2611,5 = 64508,5. \quad (4.9)$$

Годовой прирост чистой прибыли, тыс. руб. составит:

$$\Delta\Pi_{\text{ч}} = \Delta\Pi_6 \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) = 64508,5 \cdot \left(1 - \frac{20}{100}\right) = 51606,8, \quad (4.10)$$

где $\gamma = 20$ – процент налогов и отчислений.

Чистый денежный поток:

$$\text{ЧДП}_i = \Delta\Pi_{\text{ч}i} \cdot U_{ai}. \quad (4.11)$$

Чистый денежный поток нарастающим итогом:

$$\text{ЧДПНИ}_i = \text{ЧДПНИ}_{i-1} + \text{ЧДП}_i, \quad (4.12)$$

Дисконтированный денежный поток:

$$\text{ДДП}_i = \frac{\text{ЧДП}}{(1+r)^i}, \quad (4.13)$$

Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом:

$$\text{ДДПНИ}_i = \text{ДДПНИ}_{i-1} + \text{ДДП}_i, \quad (4.14)$$

Расчет срока окупаемости представлен в таблице 11.

Таблица 11 – Расчет срока окупаемости

Показатель	Значение показателя по годам расчетного периода											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1. Единовременные затраты на проведение мероприятия, тыс. руб.	39172,7											
2. То же с приведением, тыс. руб.	39172,7											
3. Годовой прирост балансовой прибыли		64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5	64508,5
4. Годовой прирост чистой прибыли		51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8	51606,8
5. Амортизационные отчисления, тыс. руб.		2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51	2611,51
6. ЧДП, тыс. руб.		54218,3	54218,3	54218,3	54218,31	54218,3	54218,3	54218,3	54218,3	54218,3	54218,3	54218,3
7. ЧДПНИ, тыс. руб.	-39172,7	15045	69263	123482	177700	231918	286137	340355	394573	448792	503010	
8. ДДП, тыс. руб.		37651,6	31376,3	26146,9	21789,1	18157,6	15131,3	12609,4	10507,8	8756,5	7297,1	
9. ДДПНИ, тыс. руб.	-32643,9	5007	36384	62530	84320	102477	117609	130218	140726	149482	156780	
10. NPV (чистая текущая стоимость)						156 780						
11. IRR (внутренняя норма доходности)						138%						
12. DPI (индекс доходности инвестиций)						5,8						
13. PP (срок окупаемости инвестиций)						0,72						
14. DPP (дисконтированный срок окупаемости)						0,86						

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе был разработан проект реконструкции КРТЭЦ-3, заключающийся в устранении перегрева КПП НД-1 и сохранении проектных значений параметров на выходе из котла. Для этого было разработано специализированное ПО, с помощью которого был произведен тепловой расчет схемы до и после реконструкции, рассчитаны данные для проведения анализа чувствительности, на его основании сформированы предпочтительные варианты и далее произведен расчет температуры стенки и выбран оптимальный вариант.

По результатам расчета можно сделать вывод, что проблема перегрева устранена, температура пара после КПП НД-1 составляет 488,5 °С, температура стенки равна 515 °С. При этом температуры перегретого и вторичного пара сохранены на уровне проектных и составляют 545 °С. В качестве решения предложено увеличение доли расхода пара в КПП НД-1 с 10% до 22%, уменьшение площади КПП НД-1 на 25% путем удаления каждого четвертого пакета в ПП, уменьшение площади КПП НД-3 на 10% путем удаления каждого десятого пакета по ширине газохода и увеличение доли газов рециркуляции на 0,4%.

По результату аэродинамического расчета выявлено, что дымососы после реконструкции работают в расчетном режиме.

Расчет затрат на проведение реконструкции и расчет срок окупаемости показал, что проект имеет высокую экономическую привлекательность, срок окупаемости с учетом дисконтирования составил 0,86 лет, резерв безопасности 118 %, индекс доходности 5,8.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы (тепловой расчет парового котла) : Учебное пособие / Е. А. Бойко, И. С. Деринг, Т. И. Охорзина. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2005. – 96 с.
2. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы (конструкционные характеристики энергетических котельных агрегатов) : Учебное пособие / Е. А. Бойко, Т. И. Охорзина. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2004. – 228 с.
3. Бойко, Е. А. Котельные установки и парогенераторы (аэродинамический расчет котельных установок) : Учебное пособие / Е. А. Бойко, И. С. Деринг, Т. И. Охорзина. Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2006. – 71 с.
4. Риск-ориентированное управление техническим состоянием технологического оборудования тепловых электростанций : монография / Е.А. Бойко, А.В. Бобров, П.В. Шишмарев [и др.] – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021.–352 с.
5. Домерман, Г.И. Calculation of boiler-utilizer based on boiler designer software / Г.И. Домерман, Б.Л. Шельгин, кандидаты техн. наук, А.В. Мошкарин, д-р техн. наук, Ю.В. Мельников, инж. // «Вестник ИГЭУ» Вып. 2 2008 г. – 7 с.
6. Новые возможности для совместного расчета котла и его пылесистем / В. М. Супранов, Г. И. Доверман, И. Г. Петров, К. А. Плешанов // Теплоэнергетика, 2022, № 2, с. 33–41.
7. Майданик, М. Н. Тепловой расчет систем пылеприготовления котельных установок: новый подход / М. Н. Майданик, А. Н. Тугова, В. М. Супранов // Теплоэнергетика, 2021, № 6, с. 25–32.
8. РТМ 24.031.08-74. Алгоритм теплового расчета котельных агрегатов с использованием ЭВМ / Министерство тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения (ПС-002/7162) – 44 с.
9. Modeling the Heat Scheme of the Combined Heat and Power Plants Using the Software Product “Boiler Designer” / Konstantin A. Shtym, Yuriy B. Goncharenko, Tatyana A. Soloveva, Dmitriy R. Bibikov and Pavel V. Vasilyev // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2021 14(1) : 130-139.

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е.А. Бойко

подпись

инициалы, фамилия

«ЕА»

06 20 23 Г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

код-наименование направления

Проект реконструкции Красноярской ТЭЦ-3

тема

Руководитель

ЕА 26.06.23
подпись, дата

профессор, д.т.н.
должность, ученая степень

Е.А. Бойко
инициалы, фамилия

Выпускник

КВЛ 26.06.23
подпись, дата

К.В. Лебедев
инициалы, фамилия

Тех. контроль

ЕА 27.06.23
подпись, дата

Е.А. Бойко
инициалы, фамилия

Нормконтролер

ПВШ 27.06.23
подпись, дата

П.В. Шишмарев
инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Тепловые электрические станции

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Е.А. Бойко

подпись

инициалы, фамилия

«23»

ЕА 2023г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы

Красноярск 2023

Студенту

Лебедеву Константину Викторовичу

фамилия, имя, отчество

Группа

ФЭ19-01Б

номер

Направление (специальность)

13.03.01

код

Теплоэнергетика и теплотехника

полное наименование

Тема выпускной квалификационной работы

Проект реконструкции

Красноярской ТЭЦ-3

Утверждена приказом по университету №

7937/с

от

23.05.2023

Руководитель ВКР

Е.А. Бойко, профессор, доктор техн. наук, кафедра ТЭС

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР

Производственная инструкция по

эксплуатации ТПЕ-216; проблема, сформулированная главным инженером в

печатном виде; комплект чертежей ТПЕ-216; решение предложенное ПАО

ТКЗ «Красный котельщик».

Перечень разделов ВКР

Вводная часть; обоснование реконструкции и

формулировка цели; описание программного продукта; расчетная часть и

сравнительный анализ; расчет срока окупаемости оптимального варианта.

Перечень графического материала

Лист 1. Продольный разрез котла ТПЕ-216

Лист 2. Поперечный разрез котла ТПЕ-216

Лист 3. Вид сверху на котел ТПЕ-216

Лист 4. Вид на группу КПП НД до и после реконструкции

Руководитель ВКР

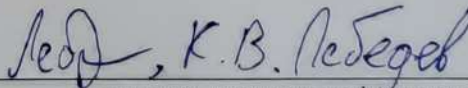


подпись



инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению



подпись, инициалы и фамилия студента

« 23 » 05 20 23 г.