

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

« ____ » _____ 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Проект безбарабанного котельного агрегата с естественной
циркуляцией высокого давления

тема

13.04.01 – теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.02 - энергоэффективные технологии производства

электрической и тепловой энергии

код и наименование магистерской программы

Руководитель

подпись, дата

зав.кафедры ТЭС, д.т.н.,

должность, учёная степень

Е.А. Бойко

инициалы, фамилия

Выпускник

подпись, дата

С.В. Головин

инициалы, фамилия

Рецензент

подпись, дата

нач. ПТО КТЭЦ-2

должность, учёная степень

В.О. Пушкарев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер

подпись, дата

П.В. Шишмарёв

инициалы, фамилия

Красноярск 2023 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Проект безбарбанного котельного агрегата с естественной циркуляцией высокого давления» содержит 95 страниц текстового документа. 8 использованных источников. 4 листа графического материала.

КОТЛОАГРЕГАТ, КОНТУР ЦИРКУЛЯЦИИ, РЕКОНСТРУКЦИЯ, ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ, ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ, МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ЭКОНОМИКА.

Объектом проектирования является паровой котёл БКЗ-420-140ПТ1. Рассмотрен вопрос реконструкции парового котла с возможностью применения в качестве сепараторов пара радиально-осевых циклонов. Цель работы заключается в сокращении времени пуска котла и затрат мазута на растопку.

Полученные результаты показывают, что проект реконструкции парового котла БКЗ-420-140ПТ1 актуален и экономически выгоден с точки зрения окупаемости и энергоэффективности.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Цели и этапы проведения исследования	7
1.1 Объект исследования.....	7
1.2 Предмет исследования.....	7
1.3 Цель работы.....	7
1.4 Методы исследования.....	8
1.5 Научная новизна и практическая значимость.....	8
1.6 Этапы проведения исследования.....	9
2 Описание объекта реконструкции	10
2.1 Технические характеристики.....	10
2.2 Конструкция топочной камеры.....	11
2.3 Конструкция барабана котла и сепарационных устройств.....	13
2.4 Пароперегреватель.....	21
2.5 Конвективная шахта.....	23
2.6 Растопка котла.....	23
2.7 Перевод котла на сжигание твёрдого топлива.....	26
2.8 Включение котла в работу.....	26
3 Разработка и обоснование технических решений	29
3.1 Преимущества и недостатки барабанного метода сепарации.....	29
3.2 Метод безбарабанной сепарации пара.....	38
3.3 Преимущества и недостатки метода безбарабанной сепарации пара.....	41
3.4 Сравнительный анализ двух схем сепарации пара.....	42
4 Тепловой расчёт	44
4.1 Исходные данные для расчёта.....	46
4.2 Элементный состав топлива.....	47
4.3 Воздух и продукты горения.....	47
4.4 Результаты теплового расчёта.....	48
5 Гидравлический расчёт контура циркуляции	58
5.1 Расчёт контура циркуляции.....	58
5.2 Описание гидравлической схемы котла.....	62
5.3 Система автоматического регулирования питания котла.....	67
5.4 Технологические защиты котла.....	72

6	Принцип действия и конструкция циклона	73
	6.1. Принцип действия радиально-осевого циклона.....	73
	6.2 Конструкция радиально-осевого циклона.....	77
7	Математический эксперимент	80
	7.1 Описание метода математического моделирования.....	80
	7.2 Этапы математического моделирования.....	81
	7.3 Результаты математического моделирования.....	84
8	Пуско-наладочные и режимные испытания	82
	8.1 Проведение пуско-наладочных работ.....	82
	8.2 Порядок проведения испытаний.....	88
	8.3 Меры безопасности при проведении пуско-наладочных работ.....	89
9	Экономическая часть	90
	9.1 Определение затрат на выполнение мероприятия.....	91
	9.2 Экономические показатели.....	91
	9.3 Показатели эффективности.....	94
	Заключение	96
	Список использованных источников	98

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время около 80% всей потребляемой энергии получают сжиганием органического топлива - угля, нефти и газа. Органическое топливо ещё ряд десятилетий будет оставаться основным из источников энергии, используемой человеком и важнейшим промышленным сырьём.

Данный вид топлива является не возобновляемым ресурсом, поэтому ключевыми вопросами экономии органического топлива и обеспечения конкурентоспособности, производства электрической и тепловой энергии, – является разработка и реализация мероприятий по снижению расходов топлива на действующем и вновь проектируемом энергетическом оборудовании. Кроме того, на сегодняшний день особое значение приобретает внедрение методов экономии топлива и интенсификации работы энергетического оборудования, не вызывающие увеличения загрязнения окружающей среды и позволяющие снизить объём продуктов сгорания и содержание в них вредных компонентов.

В современной энергетике, на тепловых станциях широкое распространение получило использование барабанных котлов высокого давления, работающих на твёрдом ископаемом топливе - угле. Например, в котельном отделении Красноярской ТЭЦ-2 установлено шесть угольных паровых котлов (три котла БКЗ-420-140ПТ1 производительностью по 380 т/ч и три котла БКЗ-500-140 производительностью 500 т/ч). Паровые энергетические котлы работают на буром угле Ирша-Бородинского разреза. Котлы объединены поперечными связями и вырабатывают пар давлением 14,0 МПа и температурой 560 °С.

Одним из недостатков котлов работающих на твёрдом ископаемом топливе является продолжительное время растопки, которое может достигать 3,5–4 часов. Основное время растопки котла (в некоторых случаях всё время) составляет работа мазутных горелок с использованием жидкого топлива – мазута.

На сегодняшний день, в связи с ростом стоимости мазута и ужесточения экологического законодательства в области охраны окружающей среды вопросы энергосбережения и использования топлива на тепловых электростанциях приобретают всё более актуальное значение.

Кроме этого стоимость электроэнергии и тепла на многих ТЭЦ, особенно оснащенных устаревшим оборудованием, оказывается высокой, а их реализация по высоким тарифам-затрудненной. Участие ТЭЦ на оптовом рынке электроэнергии (мощности) делает их практически неконкурентоспособными.

В диссертационной работе предлагается использовать радиально-осевой циклон в качестве сепаратора пара на серийно выпускаемых паровых котлах

БКЗ-420-140ПТ1 с жидким шлакоудалением, производства Барнаульского котельного завода. Данный способ позволит сократить время растопки парового котла, снизить затраты на его изготовление и транспортировку, уменьшить металлоёмкость, сделать его более манёвренным и надёжным в эксплуатации. В свою очередь, это сократит количество внеплановых остановов, приведёт к уменьшению количества мазута используемого для растопки котла и как следствие снижению количества вредных выбросов в атмосферу.

1 Цели и этапы проведения исследования

1.1 Объект исследования

Объектом исследования является паровой котёл высокого давления, БКЗ-420-140ПТ1 в составе контуров, циркуляции которого в качестве сепараторов пара используются радиально-осевые циклоны.

1.2 Предмет исследования

Предметом исследования является изучение возможности применения радиально-осевых циклонов в качестве сепараторов пара на паровых котлах высокого давления с естественной циркуляцией.

1.3 Цель работы

Целью данной работы является снижение расхода мазута используемого на растопку, снижение вредных выбросов в атмосферу во время растопки, и затрат на растопку. Увеличение манёвренности и эксплуатационной надёжности котла.

Перечисленные цели достигаются путём внедрения центробежных сепараторов пара и как следствие сокращения времени растопки котла.

Для достижения поставленных целей, необходимо решить следующие задачи:

- Выполнить поверочный тепловой расчёт котла БКЗ-420-140ПТ1;
- Выполнить гидравлический расчёт контуров циркуляции при использовании в качестве сепаратора пара штатного барабана;
- Выполнить исследование работы контура циркуляции котла с использованием в его составе радиально-осевых циклонов путём выполнения гидравлического расчёта;
- Провести анализ расчёта контуров циркуляции при использовании штатного барабана и радиально-осевого циклона;
- Выполнить конструктивный расчёт радиально-осевого циклона;
- Провести математическое моделирование работы радиально-осевого циклона с использованием метода конечных элементов;
- Разработать технические мероприятия по увеличению надёжности эксплуатации котла оснащённого радиально-осевыми циклонами;
- Разработать гидравлическую схему циркуляции котла;
- Разработать способы снижения концентрации солей в котловой воде находящейся внутри циклонов;

- Разработать способ автоматического регулирования уровня котловой воды в радиально-осевых циклонах;
- Определение эксплуатационных характеристик парового котла оснащённого радиально - осевыми циклонами в качестве сепараторов пара;
- Выполнить компоновку размещения радиально-осевых циклонов, уравнивательной ёмкости и трубопроводов на несущих элементах конструкции котла.

1.4 Методы исследования

Основными методами исследования работы парового котла БКЗ-420-140ПТ1, применяемые в данной работе, является:

- Метод анализа – применяется с целью подробного изучения объекта исследования – полностью или выборочно на основе его определенных свойств;
- Метод систематизации – это способ изучения объекта или явления как единой системы, путем объединения отдельных его частей в целое по характерным признакам каждого или, в общем;
- Метод сравнения – используется для сравнения или сопоставления (противопоставления) друг с другом двух и более объектов или явлений, изучаемых в исследовании. В данной работе делается сравнение двух схем сепарации пара. При этом делается акцент на их определенных свойствах, выбранных для сравнения;
- Метод эксперимента – проведение исследования или наблюдения за объектом или явлением при создании определенных условий. Этот метод реализуется с помощью математического моделирования с использованием программного пакета ANSYS, который представляет собой систему анализа, применяющую метод конечных элементов для моделирования потоков движения жидкостей и газов.

1.5 Научная новизна и практическая значимость

В работе впервые предлагается применение радиально-осевых циклонов в качестве сепараторов пара на котлах высокого давления БКЗ-420-140ПТ1 вместо штатного объёмного сепаратора – барабана.

Реализация данного метода сепарации пара позволит:

- сократить время растопки парового котла;
- сделать его более манёвренным и надёжным в эксплуатации;
- сократить количество внеплановых (аварийных) остановов;
- снизить расход мазута на растопку котла;

- сократить количество вредных выбросов в атмосферу.

1.6 Этапы проведения исследования

Этапы проведения исследования:

- Анализ конструкции и принципа действия сепарационных устройств и контура циркуляции штатного парового котла БКЗ-420-140ПТ1;
- Выполнение теплового и гидравлического расчётов парового котла БКЗ-420-140ПТ1;
- Определение конструкции радиально-осевого циклона;
- Разработка схемы циркуляции парового котла БКЗ-420-140ПТ1 с применением радиально-осевых циклонов. Определение количества используемых сепарационных устройств и места их размещения на котлоагрегате;
- Создание трёхмерной модели радиально-осевого циклона с использованием средств автоматизированного проектирования;
- Математическое моделирование работы радиально-осевого циклона;
- Проведение сравнительного анализа эффективности работы двух методов сепарации пара;
- Разработка технических решений позволяющих вести безаварийную эксплуатацию котла БКЗ-420-140ПТ оснащённого радиально-осевыми циклонами;
- Определение места размещения сепарационных устройств на котле;
- Создание трёхмерной модели группы радиально-осевых циклонов с использованием средств автоматизированного проектирования;
- Разработка режимной карты для безбарабанного котла высокого давления;
- Разработка рекомендаций для проведения пуско-наладочных работ и дальнейшей эксплуатации котла после реализации реконструкции по замене паровых сепараторов;
- Экономическое обоснование применения радиально-осевых циклонов на паровом котле высокого давления БКЗ-420-140ПТ1.

Результатом сравнительного анализа математических моделей двух методов сепарации (барабанного и без барабанного котлов) должна быть возможность устойчивой работы радиально-осевого циклона в составе контура циркуляции котла БКЗ-420-140ПТ1.

Кроме того, будет рассмотрен целый ряд вопросов, таких как:

- очистка котловой воды от солей;
- способы регулировки уровня воды в сепарационных устройствах;
- технологические защиты котла по повышению/понижению уровня воды в циклонах.

2 Описание объекта реконструкции

2.1 Технические характеристики

В этой главе описана работа и процесс пуска парового котла высокого давления БКЗ-420-140ПТ1. Эта информация необходима для реализации метода безбарабанной сепарации пара и понимания его принципиальной работоспособности данного вида котлах.

Котельный агрегат БКЗ–420–140ПТ1 вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, крупноблочной конструкции, предназначен для получения пара высокого давления при сжигании Ирша-Бородинского бурого угля с жидким шлакоудалением.

Котлы БКЗ-420-140ПТ1 с 25.12.1991 г. перемаркированы решением Главэнерго Минэнерго СССР № 74-7/12 от 25.12.91 г. со снижением паропроизводительности до 380 т/ч из-за недостаточного тепловосприятия водяных экономайзеров второй ступени.

Котлоагрегат имеет однокорпусную конструкцию с симметричным расположением поверхностей нагрева, П – образной компоновки. Топка является первым восходящим газоходом. В верхнем горизонтальном газоходе расположены конвективные поверхности нагрева пароперегревателя. В нисходящем газоходе расположены первая и вторая ступени водяного экономайзера и вторая ступень воздухоподогревателя. Первая ступень воздухоподогревателя вынесена за пределы котлоагрегата. Продольный и поперечный разрезы котла показаны в графической части диссертации.

Технические характеристики парового котла БКЗ-420-140ПТ1 показаны в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Технические характеристики котла БКЗ-420-140ПТ1

Наименование параметра		Значение параметра
Номинальная паропроизводительность, т/ч		420
Температура перегретого пара, °С		560
Давление перегретого пара, кгс/см ²		140
Температура питательной воды, °С		230
Температура уходящих газов, °С		147
КПД котла брутто при номинальной нагрузке, %	расчётный	92,09
	гарантийный	91,0
Расход топлива, т/ч	натурального	73,6
	условного	39,3
Теплопроизводительность, Гкал/час		250
Температура воздуха в воздухоподогревателе, °С	на входе	60
	на выходе	348
Температура газов в воздухоподогревателе, °С	на входе	430
	на выходе	147
Тепловое напряжение поперечного сечения топки, Ккал/(м ² ×ч)		2,89×10 ⁶
Тепловое напряжение объёма топки, Ккал/(м ³ ×ч)		114,5×10 ³
Объём топочной камеры, м ³		2,4×10 ³
Размеры котла по осям колонн, м	ширина	30
	глубина	36
Высота до верха хребтовой балки, м		42

2.2 Конструкция топочной камеры

Топочная камера полуоткрытого типа предназначена для сжигания бурых углей с жидким шлакоудалением. На отметке 11000 мм фронтальная и задняя стены экрана образуют пережим, который делит топку на две камеры: камеру горения и камеру охлаждения, сечение топочной камеры в пережиме по осям труб 14400×2752 мм. Камера горения выполнена в виде двух сообщающихся восьмигранных предтопок, каждый из которых оборудован восьмью угловыми прямооточными пылеугольными горелками, расположенными в два яруса по «срезанным» углам восьмигранных предтопок. Ось нижнего яруса горелок расположена на отметке 6720 мм, верхнего – на отметке 7720 мм, оси горелок каждого предтопка направлены по касательной к воображаемой окружности Ø 900 мм.

Выше основных горелок на отметке 9500 мм расположены сбросные горелки, оси которых направлены по касательной к воображаемой окружности Ø 1000 мм с закруткой в обратную сторону.

Трубы фронтального и заднего экрана в своей нижней части образуют слабонаклонный под, в котором расположены две летки, предназначенные для удаления шлака.

Для лучшей организации процесса горения, трубы, образующие камеру горения, зашипованы до устья пережима и покрыты карборундовой массой.

Покрытие экранных труб камеры горения позволяет поднять температурный уровень в камере, этим улучшается процесс воспламенения факела, и поддерживается достаточная температура на поде котла для надежного истечения шлака.

Камера охлаждения в плане имеет прямоугольную форму с размерами по осям труб 14400×6720 мм. В верхней части камеры расположены два газозаборных окна для забора топочных газов в мельницы.

Вся топочная камера полностью экранирована трубами Ø 60×6 мм Сталь 20 с шагом 64 мм. Потолок топки и поворотного газохода экранированы трубами потолочного пароперегревателя.

Пароотводящие трубы заднего экрана проходят внутри газохода и служат подвесками заднего экрана. Остальные топочные блоки подвешены с помощью специальных подвесок к потолочной раме.

При нагревании топочная камера свободно расширяется вниз. Жесткость и прочность стен топочной камеры обеспечивают установленные по периметру топки горизонтальные пояса жесткости. Горизонтальные нагрузки от стен топочной камеры при случайных бросках давления «хлопках» в топке воспринимаются основным каркасом котла через пояса и специальные скользящие крепления и упоры, не препятствующие тепловым перемещениям экранов. Для подвески камеры горения экранные трубы в районе пережима посредством хомутов связаны с водоопускными трубами. Для увеличения плотности топочная камера и потолочный пароперегреватель снаружи по трубам обшиты металлическим листом, сверху листов выполнена изоляция из вулканитовых плит.

Подвод воды из барабана к нижним камерам экранов осуществляется восемнадцатью стояками из труб Ø 219×18 мм сталь 20 и трубами Ø 133×10 мм сталь 20. Пароводяная смесь из верхних камер фронтального и боковых экранов отводится в барабан трубами Ø 133×13 мм сталь 20, а из камер заднего экрана трубами Ø 133×10 мм сталь 12Х1МФ. Камеры экранной системы выполнены из труб Ø 273×36 мм сталь 20.

Для растопки и подсветки факела на котле предусмотрена установка четырёх механических, либо парового распыления форсунок, производительность форсунок парового распыления 1,1 т/ч.

2.3 Конструкция барабана котла и сепарационных устройств

Барабан котла с внутренним \varnothing 1600 мм и толщиной стенки 112 мм выполнены из стали 16ГНМА.

Средний уровень воды в барабане котла должен поддерживаться на 200 мм ниже геометрической оси барабана. Высший и низший уровень расположены соответственно выше и ниже установленного среднего уровня на 150 мм.

Для обеспечения равномерного прогрева барабана при растопке предусмотрен паровой разогрев его от постороннего источника насыщенным паром давлением $40 \div 162$ кгс/см². На линии подвода пара к барабану установлены: обратный клапан, регулирующая и запорная арматура. Внутри барабана котла размещены верхний и нижний коллекторы, для распределения пара по всему объёму.

Тепловое расширение барабана обеспечивается роликовыми опорами, устанавливаемыми на основных балках каркаса рисунок 2.1. Во время работы барабан удлиняется на $70 \div 100$ мм.

Для предупреждения перепитки котла в барабане установлена труба аварийного слива. Для ввода и раздачи фосфатов внутри барабана имеется перфорированная труба.

Вся питательная вода после водяного экономайзера поступает в питательные короба барабана; 50% ее из питательных коробов направляется на промывочные листы, протекает по ним и через гидравлический подпор сливается в водяной объем барабана. Остальные 50% воды непосредственно из питательных коробов сливаются в водяной объем барабана, помимо промывочных листов, рисунок 2.2.

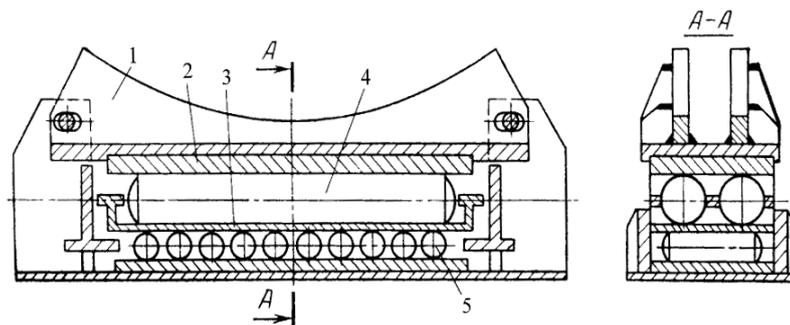
На котле применена схема двухступенчатого испарения с выносными циклонами. Сепарационные устройства первой ступени испарения расположены в барабане и представляют собой сочетание внутрибарабанных циклонов, барботажной промывки пара и дырчатых листов. Пароводяная смесь из экранов, включенных в первую ступень испарения, поступает во внутрибарабанные циклоны, где происходит отделение капель воды из потока пара.

Выделившаяся вода сливается в водяной объем барабана, а пар направляется к промывочным листам, где происходит его барботажная промывка питательной водой. После промывки предусмотрена сепарация пара в паровом объеме барабана и дырчатом потолке. Отсепарированный пар по пароотводящим трубам направляется в пароперегреватель.

Сепарационными устройствами второй ступени испарения являются выносные циклоны, выполненные из труб $\text{Ø } 426 \times 36$ мм сталь 20 и расположенные блоками (по три циклона в каждом блоке) на отметке барабана котла с левой и правой его стороны.

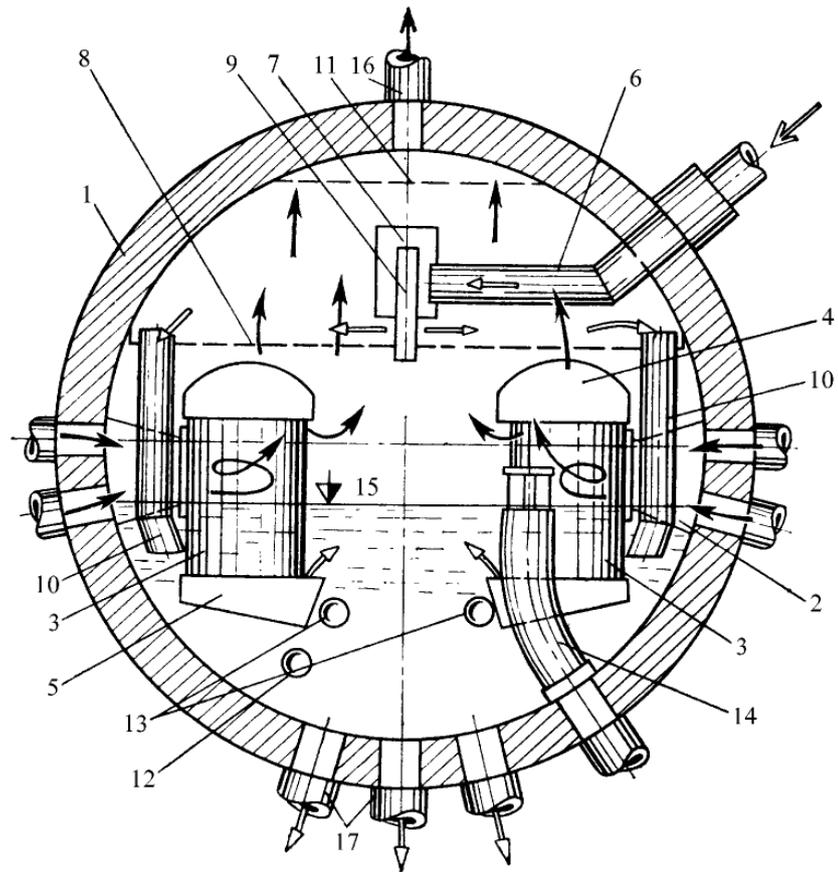
Одним из самых распространённых методов сепарации пара на сегодняшний день, применяемый на паровых котлах, является использование барабана с расположенными внутри его объёма сепарационными устройствами.

Пар, выходящий из барабана, не должен уносить с собой капли воды в пароперегреватель, так как при испарении воды содержащейся в ней соли могут отлагаться в трубах пароперегревателя, что связано с опасностью их пережога. Для уменьшения уноса воды из барабана паром внутри барабана устанавливаются сепарационные устройства, предназначенные для разделения (сепарации) влаги и пара. Этим условиям отвечают циклонные сепараторы, размещаемые внутри барабана, так называемые внутрибарабанные циклоны, получившие широкое распространение, рисунок 2.2.



- 1 – подушка;
- 2 – плита;
- 3 – обойма;
- 4 – поперечные ролики;
- 5 – продольные ролики.

Рисунок 2.1 Подвижная роликовая опора барабана котлоагрегата.



- 1 – Барабан;
- 2 – Короб для вводимой в барабан пароводяной смеси;
- 3 – Циклон;
- 4 – Крышка циклона;
- 5 – Поддон циклона;
- 6 – Труба, подающая питательную воду;
- 7 – Короб, раздающий питательную воду;
- 8 – Промывочный лист;
- 9 – Насадка, отводящая воду помимо промывочных щитов;
- 10 – Труба для слива питательной воды;
- 11 – Верхний дырчатый лист;
- 12 – Труба для подачи фосфатов;
- 13 – Труба для парового разогрева барабана;
- 14 – Труба для аварийного сброса воды;
- 15 – Средний уровень воды;
- 16 – Выход насыщенного пара;
- 17 – Водоопускные трубы экранов.

Рисунок 2.2 Внутрибарабанные циклоны.

Пароводяная смесь вводится в циклон по касательной к поверхности цилиндра, центробежная сила прижимает крупные капли воды к стенкам циклона, по которым они стекают в низ. Благодаря поддону, расположенному под циклоном, вихревое движение не передаётся воде, находящейся в водяном

пространстве барабана, и поверхность воды остаётся спокойной. Пар выходит из верхней части циклона и проходит через верхний дырчатый лист, улавливающий мелкие капли воды, оставшиеся в паре.

В барабанах большой производительности устанавливают десятки таких циклонов.

Часто для сепарации пара применяются жалюзийные щиты, состоящие из гофрированных стальных пластин, которые устанавливаются в верхней части барабана. Пар поднимается по каналам, образуемым пластинами, и находящиеся в нём капли влаги оседают на пластинах и стекают вниз. Отдельные капли воды, оставшиеся в паре, улавливаются дырчатым листом.

Для хорошей сепарации влаги в жалюзийных щитах не должно оставаться щелей, по которым мог бы протекать пар помимо каналов, образуемых пластинами.

Котловая вода содержит значительное количество растворенных щелочей и фосфатов, которые способствуют образованию слоя пены на поверхности воды в барабане.

При интенсивном парообразовании часть пены может уноситься с паром из барабана и растворённые в ней вещества могут образовывать в трубах пароперегревателя слой опасной накипи. Для борьбы с этим явлением применяется, размыв пены питательной водой, в которой содержится меньше солей. Благодаря этому пена растворяется в питательной воде и её слой уменьшается.

Для промывки пара питательной водой в верхнюю часть барабана вводится питательная вода, вытекающая из горизонтальной трубы, разливается по дырчатому щиту и стекает в отводящий короб. Пар промывается, проходя снизу-вверх через отверстия в щите и слой воды.

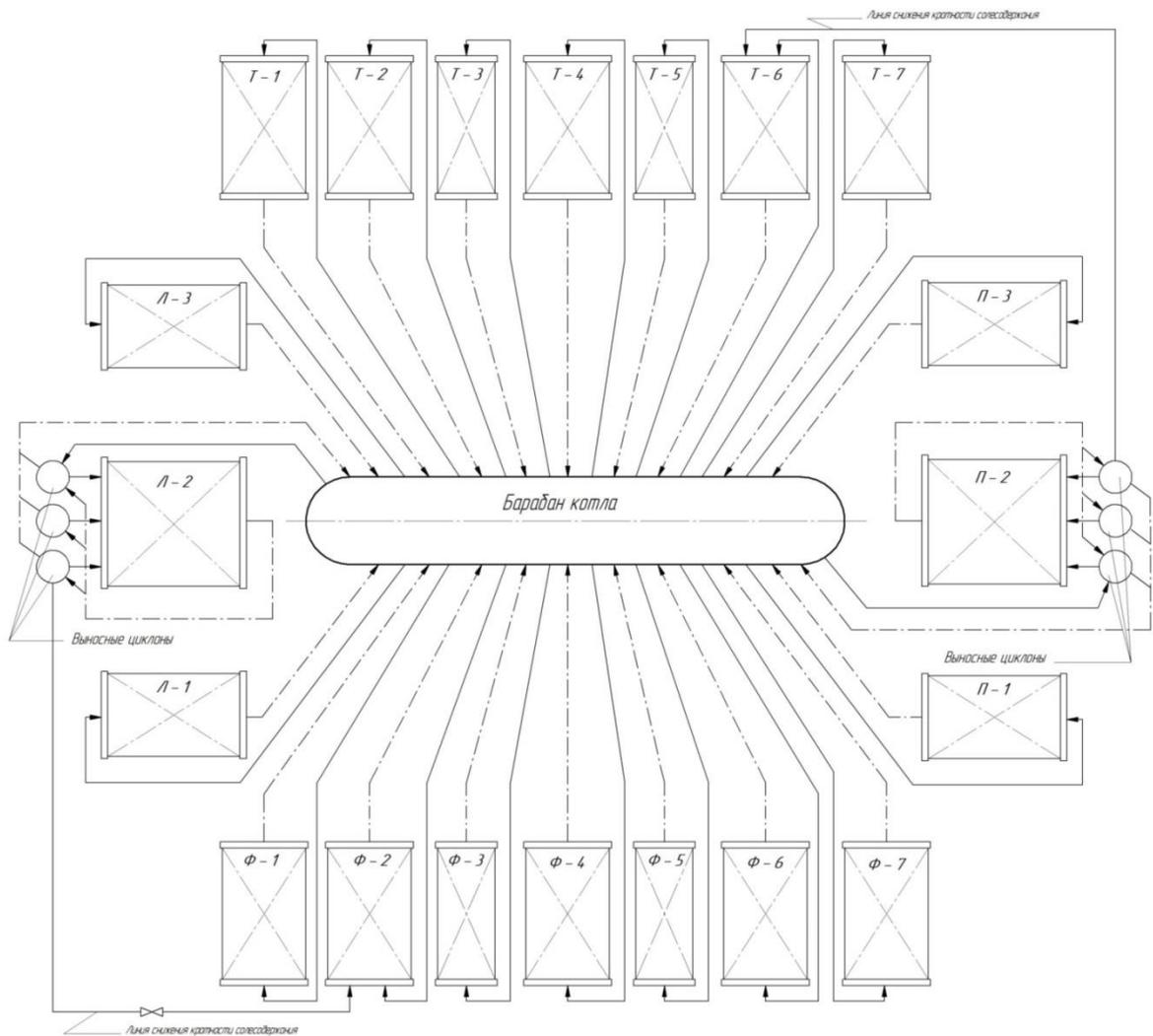
Для удаления отдельных капель из пара служит верхний перфорированный стальной лист.

При генерации пара не происходит глубокого выпаривания воды, поэтому большинство находящихся в растворённом состоянии примесей постепенно может достичь предельной концентрации. Для поддержания в котловой воде концентрации примесей на заданном уровне часть воды из барабанных котлов непрерывно удаляется.

Так как с непрерывной продувкой происходит потеря тепла и чем выше концентрация солей, тем больше величина продувки, что экономически невыгодно. Поэтому в современных барабанных котлах организовано двух и трёх ступенчатое испарение.

При двух ступенчатом испарении водяной объём барабана разделяется перегородками на чистый и один (или два) солевых отсека. К каждому из отсеков присоединяется своя группа экранов. В солевые отсеки обычно выделяют один или оба торцевых участка барабана и от 5 до 30% поверхности нагрева экранов. [7]

Котёл БКЗ-420-140ПТ1 является котлом с естественной циркуляцией, то есть движение воды и пароводяной смеси в опускных и экранных трубах, создаётся разностью их плотностей, вследствие более интенсивного обогрева экранных труб.



Л – экраны с левой стороны; П - экраны с правой стороны;
Т – экраны с тыловой стороны; Ф – экраны с фронтальной стороны.

Рисунок 2.3 Схема циркуляции парового котла БКЗ-420-140ПТ1.

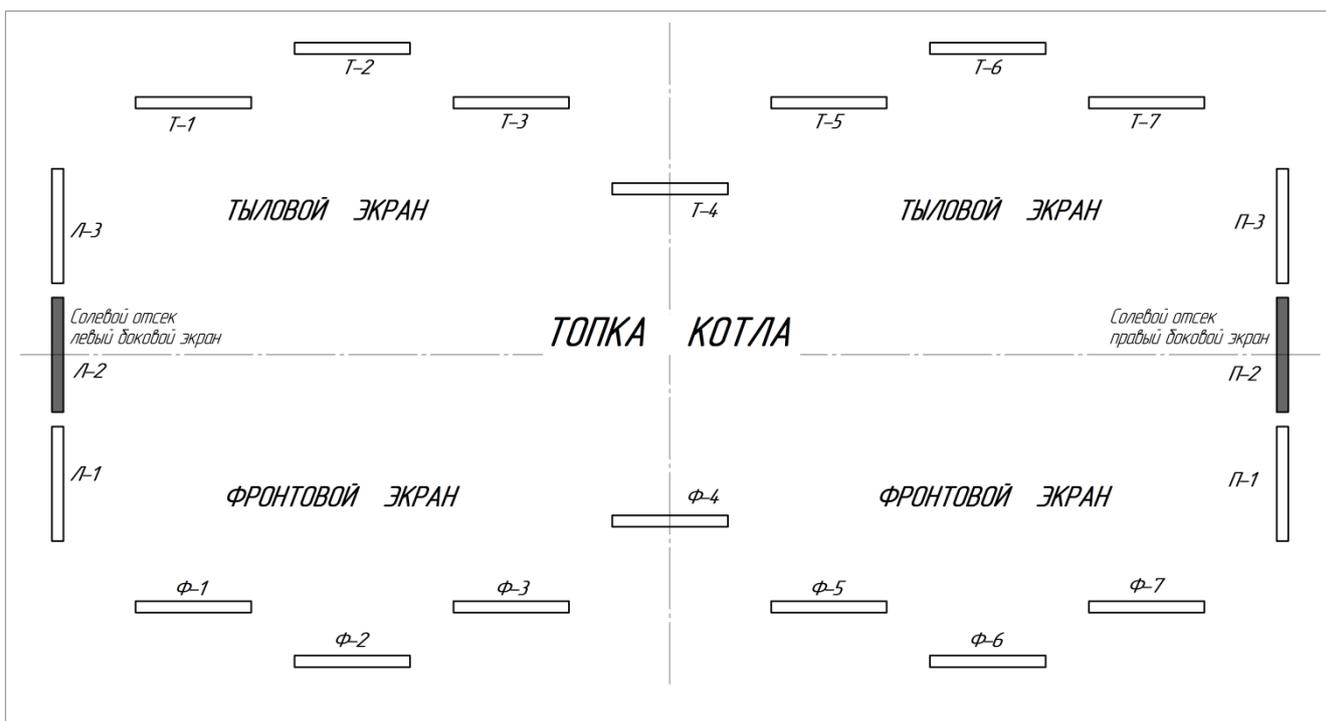


Рисунок 2.4 Схема расположения настенных экранов парового котла БКЗ-420-140ПТ1.

Схема циркуляции котла показана на рисунке 2.3 и предусматривает глубокое секционирование экранов на 20 самостоятельных контуров, что обеспечивает более равномерное тепловосприятие экранных труб и повышает надежность циркуляции. Условное расположение экранов в топке котла показано на рисунке 2.4.

Барaban объединяет 18 контуров циркуляции из которых 14 экранов составляют тыловые и фронтальные поверхности Т1÷Т7; Ф1÷Ф7 и 4 поверхности слева и справа по две с каждой стороны Л1; Л3 и П1; П3. Экранные поверхности Л2 и П2 работают в составе контуров циркуляции включенных на 6 выносных циклонов по 3 циклона с каждой стороны котла.

Питательная вода поступает в барабан котла из экономайзера второй ступени, под действием давления создаваемого питательным насосом. Из барабана вода по опускным трубам поступает в нижние камеры, а далее в трубные системы топочных экранов, где она нагревается и частично испаряясь, превращается в пар, таким образом, образуется пароводяная смесь, которая поступает обратно в барабан, где происходит разделение фаз на воду и пар. Под действием разности плотностей в опускных и подъемных трубах создается непрерывное движение воды или циркуляция. Эту разность плотностей называют движущим напором циркуляционного контура.

Часть экранных труб, в которых отсутствует кипение, называют экономайзерным участком на котором температура воды увеличивается до

состояния насыщения, а участок, по которому движется пароводяная смесь, называют паросодержащим участком. Полезной высотой называют ту ее часть, которая создает циркуляцию воды в контуре.

Расход воды через циркуляционный контур превышает количество образующегося в нем пара. Отношение количества воды, вошедшей в контур, к количеству образующегося в нем пара называют кратностью циркуляции.

Опасным режимом для опускной части контура является парообразование в опускных трубах, которое может возникнуть как следствие падения давления во входном сечении трубы (явление кавитации). Это явление наступает, если высота уровня воды в барабане до входа в опускные трубы меньше потерь напора при входе в опускные трубы. Чтобы исключить режим кавитации в них, необходимо соблюдать условие:

Опасными режимами для подъемной части контура являются:

- образование застоя среды в подъемных трубах;
- «опрокидывание» циркуляции;
- расслоение потока пароводяной смеси;
- режим предельной кратности циркуляции.

Застой среды в подъемных трубах может произойти из-за неравномерности их обогрева. Неравномерный обогрев подъемных труб возникает вследствие:

- конструктивных особенностей циркуляционных контуров;
- условий эксплуатации.

Конструктивные особенности котла обусловлены различной длиной обогреваемых участков, необходимостью обвода экранных труб вокруг амбразур и горелок.

Эксплуатационными факторами являются: шлакование экранов и конвективных пучков, заносы поверхностей нагрева летучей золой, резкое изменение режима топki.

Опрокидывание циркуляции, под которым понимают переход от подъемного движения воды и пароводяной смеси к опускному, имеет место в трубах, выведенных в водяное пространство барабана. При этом неизбежны образование свободного уровня и связанная с ним опасность пережога труб.

2.4 Пароперегреватель

Пароперегреватель по характеру восприятия тепла делится на три части: радиационную, полурadiационную и конвективную. Радиационную часть составляют трубы потолка, полностью экранирующие потолок топочной камеры и верхнюю часть конвективного газохода. Полурadiационная часть состоит из 24 топочных ширм, расположенных на выходе в поворотный горизонтальный газоход. Конвективная часть пароперегревателя расположена в поворотном горизонтальном газоходе котла.

Движение пара в пароперегревателе происходит двумя отдельными потоками. Каждый поток имеет два переброса по ширине газохода. Кроме того, предусмотрено смешивание потоков в смешивающих камерах потолочного пароперегревателя и растопочного пароохладителя. Схема пароперегревателя показана на рисунке 2.5.

Движение пара по пароперегревателю происходит следующим образом. Из барабана по 14 трубам $\text{Ø } 133 \times 13$ мм Сталь 20 пар поступает в 7 входных камер $\text{Ø } 219 \times 25$ мм Сталь 20 потолочного пароперегревателя.

Из камер по 358 трубам $\text{Ø } 38 \times 4$ мм Сталь 20 (3 средние панели из 154 труб $\text{Ø } 38 \times 4,5$ мм сталь 12X1МФ) пар идет в потолочный пароперегреватель. 50% пара непосредственно перед змеевиками первой ступени пароперегревателя по 179 трубам (через одну) заходят в 7 смешивающих камер $\text{Ø } 159 \times 13$ мм сталь 12X1МФ, а оттуда по трубам $\text{Ø } 32 \times 4$ мм сталь 20 в пароперегреватель первой ступени, состоящий из 179 двухниточных пакетов змеевиков, выполненных из труб $\text{Ø } 32 \times 4$ мм сталь 20 (на выходе сталь 12X1МФ).

Змеевики пакетов I ступени пароперегревателя выполнены целиком из труб $\text{Ø } 38 \times 4,5$ мм сталь 12X1МФ. Остальные 50% пара по 179 трубам $\text{Ø } 38 \times 4$ мм сталь 20 (3 средние панели - $\text{Ø } 38 \times 4,5$ мм сталь 12X1МФ), переходящим в трубы $\text{Ø } 32 \times 4$ мм сталь 20 поступает в 3 смешивающие камеры $\text{Ø } 159 \times 13$ мм сталь 12X1МФ, расположенные за змеевиками первой ступени. Из смешивающих камер по 179 трубам $\text{Ø } 32 \times 4$ мм сталь 20 пар проходит по потолку поворотной камеры и возвращается в 179 пакетов змеевиков первой ступени. Весь пар проходит противотоком пакеты первой ступени и поступает в 7 выходных камер $\text{Ø } 273 \times 25$ мм сталь 12X1МФ, откуда по 14 трубам $\text{Ø } 133 \times 13$ мм сталь 20 направляется в смешивающую камеру растопочного пароохладителя, выполненного из труб $\text{Ø } 325 \times 36$ мм сталь 12X1МФ, а затем в две камеры $\text{Ø } 273 \times 25$ мм сталь 12X1МФ. Из камер пар по 12 трубам $\text{Ø } 133 \times 13$ мм сталь 20 поступает в 12 средних топочных ширм, выполненных из труб $\text{Ø } 32 \times 4$ мм сталь 12X1МФ. Далее пар поступает в два впрыскивающих

пароохладителя первой ступени. Камеры пароохладителя выполнены из труб $\varnothing 325 \times 36$ мм сталь 12Х1МФ.

В пароохладителях происходит полное перемешивание пара в потоке и осуществляется его переброс по ширине газохода. Из левого пароохладителя пар направляется в 6 правых крайних топочных ширм, а из правого пароохладителя в 6 левых крайних топочных ширм. Крайние ширмы выполнены также из труб $\varnothing 32 \times 4$ мм сталь 12Х1МФ.

Пройдя их прямоотками пар по 12 трубам $\varnothing 133 \times 10$ мм сталь 12Х1МФ поступает в две камеры $\varnothing 325 \times 36$ мм сталь 12Х1МФ. Из этих камер пар по 16 трубам $\varnothing 133 \times 10$ мм сталь 12Х1МФ поступает в 16 средних ширм третьей ступени, выполненных из труб $\varnothing 32 \times 5$ мм сталь 12Х1МФ, из ширм по 16 трубам $\varnothing 133 \times 13$ мм сталь 12Х1МФ направляется в два впрыскивающих пароохладителя второй ступени.

Камеры пароохладителя выполнены из труб $\varnothing 325 \times 36$ мм сталь 12Х1МФ. В пароохладителях второй ступени также происходит перемешивание каждого потока пара и осуществляется переброс его по ширине газохода слева направо и наоборот. Из пароохладителей второй ступени пар по 14 трубам $\varnothing 133 \times 13$ мм сталь 12Х1МФ поступает в 14 крайних выходных ширм четвертой ступени, выполненных из труб $\varnothing 32 \times 4$ мм сталь Х18Н12Т. Пройдя их прямоотком, пар по 14 трубам $\varnothing 133 \times 20$ мм сталь 12Х1МФ поступает в две паросборные камеры. Паросборные камеры изготовлены из труб $\varnothing 273 \times 45$ мм сталь 12Х1МФ.

2.5 Конвективная шахта

Конвективная шахта представляет собой опускной газоход, в котором размещены «в рассечку» водяной экономайзер и воздухоподогреватель. Вторая по ходу воды ступень водяного экономайзера занимает всю глубину газохода, после чего размещается подогреватель воздуха II ступени и водяной экономайзер I ступени, который разделяет уходящие газы на два потока по глубине газохода.

Первая ступень воздухоподогревателя выполнена отдельно стоящей колонкой для предотвращения возможной цементации отложений золы при попадании на нее влаги. Кубы воздухоподогревателя сварены между собой и образуют бесприсосную шахту.

Вторая ступень воздухоподогревателя и первая ступень водяного экономайзера выполнены свободно опирающимися друг на друга и на раму каркаса с приваром мест примыкания. Этим достигается высокая плотность по газовым и воздушным сторонам. При тепловом расширении конвективная шахта поднимается вверх от рамы каркаса. Для создания плотности на стыке второй ступени водяного экономайзера и второй ступени воздухоподогревателя установлено песочное уплотнение.

Водяной экономайзер выполнен в виде змеевиков из труб $\text{Ø } 32 \times 4$ мм сталь 20. Воздухоподогреватель выполнен из труб $\text{Ø } 40 \times 1,5$ мм материал сталь 3ст.

На котлах БКЗ–420-140ПТ1 тракты ДРГ распараллелены раздаточным коллектором, на котором установлено два шиберы для регулирования расхода дымовых газов, поступающих в конвективную шахту после II ступени водяного экономайзера в качестве присадки для снижения температуры металла трубной доски ВЗП II ступени. При повышении температуры металла трубной доски ВЗП II ступени необходимо открыть шиберы и отрегулировать расход дымовых газов таким образом, чтобы температура металла снизилась до расчетного значения.

2.6 Растопка котла

Перед растопкой котла топка и газоходы, включая рециркуляционные, должны быть провентилированы дымососом, дутьевым вентилятором и дымососами рециркуляции при открытых шиберах газовоздушного тракта не менее 10 минут с расходом воздуха не менее 25% номинального. Далее, зажигается с помощью ручного растопочного факела растопочная мазутная форсунка одной из горелок. Розжиг мазутных форсунок производится по месту. Контроль за состоянием горелок осуществляется визуально по месту.

Воздействуя на подачу мазута и воздуха отрегулировать горение мазута так, чтобы оно было полным и бездымным, а факел устойчивым и достаточно мощным, и чтобы он не бил в противоположную стенку. Тем же способом разжечь вторую мазутную форсунку в другом предтопке. Растопку вести не менее чем на двух горелках. По мере разогрева топочной камеры производить переключения работающих форсунок, чтобы обеспечить равномерный прогрев топочной камеры.

Контроль за скорость растопки должен производиться по температуре насыщения. Для уменьшения инертности эту температуру следует замерять на одной из паропроводящих труб в средней части барабана, причем место зачеканивания термомпары должно находиться от барабана не менее, чем на 250–300 мм. Скорость роста температуры насыщения должна быть постоянной во все время растопки и не должна превышать 3 °С/мин., тогда рост давления в котле будет протекать примерно в соответствии с графиком подъема давления в котле.

Особое внимание уделяется равномерности подъема давления в интервале 0–6 кгс/см².

При прогреве котла уровень воды в барабане следует поддерживать между верхним и нижним допустимыми уровнями, периодически сбрасывая излишки воды через линию аварийного слива. Подпитка котла при растопке производится через узел питания. При подпитках вентили на линии рециркуляции из барабана в водяной экономайзер закрываются.

При подпитке температура воды, поступающей в барабан, не должна отличаться от температуры тела барабана более чем на 40 °С. Если в момент подпитки температура воды за водяным экономайзером выше температуры стенки барабана более, чем на 40°С, то нужно усиленно подпитать котел в течение 2–3 минут, сбрасывая излишки воды из барабана через аварийный слив. Охлаждение водяного экономайзера в начале растопки производится либо питательной водой при подпитке котла, либо котловой водой путем ее рециркуляции из барабана к водяному экономайзеру при отсутствии подпитки. Не следует допускать изменений температуры питательной воды, подаваемой в водяной экономайзер, так как это может вызвать повреждения сварных стыков змеевиков экономайзера.

При растопке котла необходимо следить за температурой металла змеевиков пароперегревателя. Режим растопки организовать таким образом, чтобы эти температуры не превышали допустимых значений. В случае недостаточности охлаждения труб протекающим паром, следует изменить режим растопки, чтобы не допустить чрезмерного повышения температуры

дымовых газов в районе пароперегревателя. Кроме того, для защиты металла змеевиков топочных ширм во время растопки на котле установлен растопочный пароохладитель с впрыском питательной воды. При этом необходимо следить, чтобы температура пара за пароохладителем не менее, чем на 20-30°C превышала температуру насыщения пара, для предотвращения заброса воды в пароперегреватель.

В процессе растопки следует по реперам следить за равномерным расширением элементов котла. В случае заземления элементов следует выяснить причину и устранить ее.

Перед розжигом мазутных форсунок проводится операция парового разогрева барабана, прогревается и ставится под давление общий коллектор, открывается ручная арматура. Включается паровой разогрев с началом растопки, расход пара регулируется дистанционно и выбирается таким образом, чтобы скорость повышения температуры нижней образующей барабана не превышала 30°C/10мин., разность температур верхней и нижней образующей барабана не превышала 60°C. При давлении 40 кгс/см² подача пара на паровой разогрев барабана прекращается.

Полная равномерность разогрева барабана обеспечивается лишь после начала интенсивной циркуляции воды, начинающейся в свою очередь лишь при появлении устойчивого и возможно большего расхода пара от котла

В первый момент растопки образующийся пар стравливается в атмосферу через линию продувки пароперегревателя, затем по мере роста давления через растопочную РОУ. Прогрев растопочной РОУ производится при давлении в котле 5–6 кгс/см² открытием обвода задвижки перед растопочной РОУ и дренажных вентилей или частичным открытием задвижки перед РРОУ. Задвижку перед РРОУ открыть полностью при давлении большем противодавления РРОУ на 2–3 кгс/см². После включения РРОУ закрыть дренажи паропроводов, кроме дренажа перед магистральной задвижкой у главных паропроводов.

Расход пара на РРОУ устанавливается из условий поддержания необходимой скорости подъема давления в котле и достаточного охлаждения змеевиков пароперегревателя, для предохранения змеевиков пароперегревателя от перегрева растопку котла до включения его в магистраль не целесообразно вести с повышенными избытками воздуха.

Статистика растопки котлов БКЗ-420-140ПТ1 ст. №1; 2; 3, на филиале Красноярская ТЭЦ-2 за 2020 г. и 2021 г. год показана в таблице 1 и 2 соответственно.

2.7 Перевод котла на сжигание твёрдого топлива

При переводе котла на сжигание твердого топлива все мазутные горелки должны находиться в работе. Перевод котла на сжигание твердого топлива должен производиться при тепловой нагрузке, обеспечивающей устойчивое воспламенение пыли, при давлении в барабане котла не ниже 40 кгс/см² и температуре в поворотной камере не ниже 360°С.

Проводятся операции по включению в работу пылесистем.

При достижении устойчивого горения пыли в топке приступают к последовательному отключению мазутных форсунок и увеличению подачи пыли в топку. Отключение последней мазутной форсунки выполняют при достижении нагрузки на котле не ниже 70% номинальной.

При включении пылесистем контролируются: уровень воды в барабане, температура металла змеевиков пароперегревателя, температурой газов по газовому тракту, за отсутствием сепарации пыли.

Продолжительность растопки, исходя из допустимых термических напряжений стенок барабана котла, обеспечения надежной циркуляции, допускаемых температур металла труб пароперегревателя, составляет не менее 3,5–4 часов.

Перед растопкой котла из неостывшего состояния при сохранении избыточного давления в пароводяном тракте вентиляция должна начинаться не ранее, чем за 15 минут до розжига горелок.

2.8 Включение котла в работу

Включение котла в магистраль производится после прогрева паропровода при равных давлениях по обе стороны задвижки, используемой для включения котлоагрегата. Включение котла в магистраль при давлении в котле, превышающем давление в паропроводе, запрещается во избежание заброса воды в пароперегреватель. Температура перегретого пара при включении котла в магистраль должна составлять 560 °С.

После включения котла приступают к отключению РРОУ и подъему нагрузки, тщательно следя при этом за показаниями манометра и расходомерами пара за котлом.

Статистика количества пусков котлов БКЗ-420-140ПТ1 на Красноярской ТЭЦ-2 за 2020 и 2021 гг. показана на рисунке 2.6 и в таблицах 2.2 и 2.3.

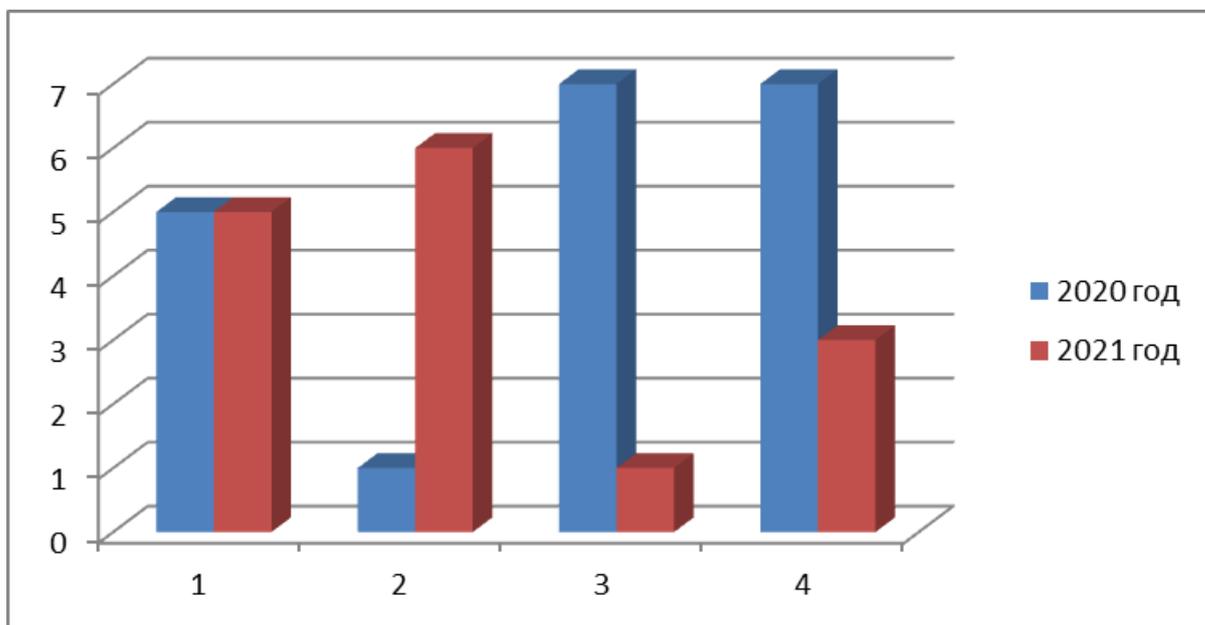


Рисунок 2.6 Количество проведённых растопок котлов БКЗ-420-140ПТ1 в квартал, за 2020 и 2021 гг. на Красноярской ТЭЦ-2.

Таблица 2.2 - Статистика растопки котлов БКЗ-420-140ПТ1, на филиале Красноярская ТЭЦ-2 за 2020 год

	Январь	Февраль	Март	Кварт. I	Апрель	Май	Июнь	Кварт. II	1 полугодие	Июль	Август	Сентябрь	Кварт. III	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Кварт. IV	2 полугодие	Количество пусков за 20 год	Количество пусков с начала экспл. на 01.01.2020.	Количество пусков с начала экспл. на 01.01.2021.
КА-1	1	0	0	1	0	0	1	1	2	1	2	1	4	0	2	1	3	7	9	352	361
КА-2	2	0	2	4	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	3	3	3	7	336	343
КА-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	3	0	1	0	1	4	4	300	304

Таблица 2.3 - Статистика растопки котлов БКЗ-420-140ПТ1, на филиале Красноярская ТЭЦ-2 за 2021 год

	Январь	Февраль	Март	Кварт. I	Апрель	Май	Июнь	Кварт. II	1 полугодие	Июль	Август	Сентябрь	Кварт. III	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Кварт. IV	2 полугодие	Количество пусков за 21 год	Количество пусков с начала экспл. на 01.01.2021.	Количество пусков с начала экспл. на 01.01.2022.
КА-1	0	2	0	2	1	0	0	1	3	0	0	0	0	1	1	0	2	2	5	361	366
КА-2	1	0	0	1	1	0	1	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	343	346
КА-3	2	0	0	2	0	1	2	3	5	1	0	1	1	1	0	0	1	2	7	304	311

3. Разработка и обоснование технических решений

3.1 Преимущества и недостатки барабанного метода сепарации пара

В этой главе рассматриваются основные преимущества и недостатки двух методов сепарации пара, а также основные технические решения позволяющие реализовать безбарабанный метод сепарации пара на паровом котле БКЗ-420-140ПТ1.

На электростанциях с пересечёнными связям, к которым относится Красноярская ТЭЦ-2, как правило, число котельных агрегатов, не равно числу турбин, поэтому их пуск может осуществляться независимо (индивидуально) друг от друга.

Процесс пуска делится на три этапа: заполнение котла водой, растопку котла, обеспечивающую устойчивый режим горения в топочной камере и наконец, постепенное повышение параметров пара до номинальных значений, сопровождающееся аккумулярованием теплоты в котельном агрегате. Пуск котла осуществляется по режимной карте. Режимная карта пуска котла БКЗ-420-140ПТ1 показана на рисунке 3.1.

По горизонтальной оси режимной карты отмечены основные операции выполняемые оперативным персоналом в данный момент времени:

1. Подготовка котла к пуску;
2. Вентиляция топки (включение дымососов, дутьевых вентиляторов, дымососов рециркуляции газов) не менее 10 мин.
3. Отключение дымососов рециркуляции газов, розжиг растопочных мазутных форсунок;
4. Прогрев топки котла;
5. Закрытие воздушников, продувка водоуказательной колонки и нижних точек при давлении 3-4; 20-30; 50-60; 80-90 кгс/см².
6. Открытие главных паровых задвижек 203; 204 и дренажей паропровода, прогрев растопочного РОУ;
7. Включение растопочного РОУ, закрытие дренажей паропровода, кроме дренажа перед 201 задвижкой;
8. Перевод котла на пыль (включение пылепитателей при давлении ≥ 40 кгс/см² и температура газов в поворотной камере ≥ 360 °С). Включение первой пылесистемы;
9. Включение непрерывной продувки, включение второй пылесистемы, открытие байпаса на задвижке 201, включение котла в паровую магистраль, закрытие байпаса задвижки 201, закрытие задвижек продувки котла в атмосферу, отключение мазутных форсунок, включение фосфатного насоса.

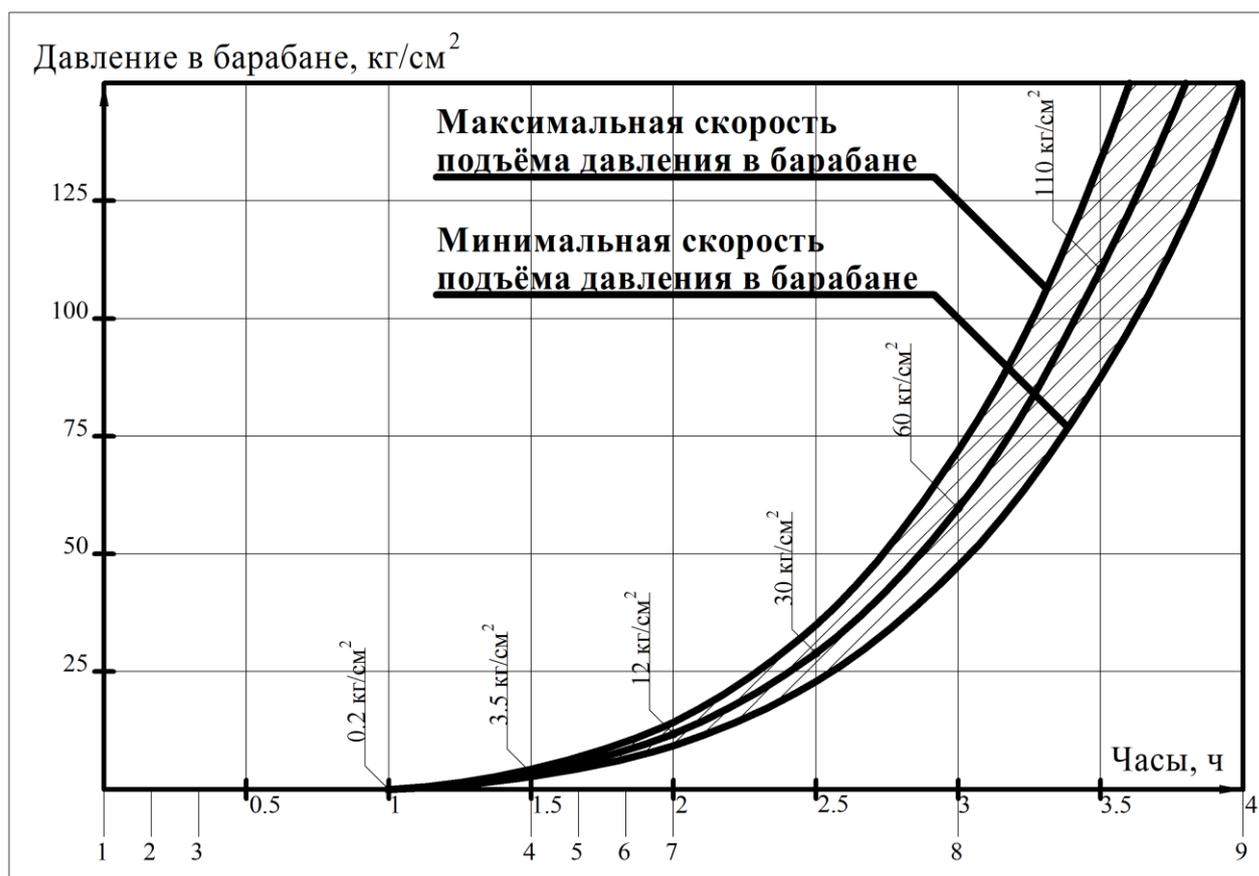


Рисунок 3.1 Режимная карта пуска котла БКЗ-420-140ПТ1.

Растопочный процесс заканчивается после достижения параметрами пара номинальных значений и завершается подключением котельного агрегата к магистральному паропроводу. Это подключение должно производиться при примерном равенстве давлений в барабане котла и в паропроводе. Если давление пара в барабане котла будет значительно выше, чем в паропроводе, то скачок расхода пара в котле может вызвать заброс воды в пароперегреватель из-за «набухания» водяного объема в барабане, что поведет к резкому понижению температуры пара перед ближайшими к месту подключения турбинами.

При заполнении барабанного котла водой следует предохранять его барабан от температурных напряжений, так как они при многократных повторных пусках вызывают малоцикловую усталость металла и трещины в стенках барабана.

В котлах, работающих на твердом топливе, надежное воспламенение угольной пыли без предварительного подогрева топочной камеры затруднено, а иногда невозможно. Этот подогрев производится растопочным топливом — мазутом, с переходом на пылеугольное топливо лишь после создания в топке температуры, достаточной для его воспламенения. Длительность и уровень предварительного подогрева топочной камеры пылеугольных котлов

определяются реакционной способностью топлива, его влажностью и зольностью. Чем меньше реакционная способность топлива, тем, естественно, дольше продолжается предварительный подогрев топочной камеры.

Как и при заполнении котельного агрегата, водой, так и при постепенном повышении параметров пара в процессе растопки в металле барабана возникают высокие температурные напряжения. Эти напряжения возникают, вследствие перепада температур по толщине стенки барабана из-за медленного прогрева металла по всему объёму, определяемого температуропроводностью стали, и зависят от толщины стенки, и от скорости повышения температуры насыщения среды, которая, в свою очередь, определяется скоростью повышения давления в барабане котла.

Места расположения контрольных точек на теле барабана показаны на рисунке 3.2, а графики изменения температуры металла барабана котла и основных его параметров во время растопки из холодного состояния показаны на рисунках 3.3 ÷ 3.6.

Оперируя значениями температуры металла барабана в момент растопки котла можно вычислить разницу температуры металла, верх/низ барабана. Анализируя эти графики можно видеть, что максимальная разница температуры возникает в начальный момент растопки котла и достигает значения 21 °С. Таким образом, максимальные температурные деформации барабана возникают именно в начале процесса растопки котла. Этот перепад в период пуска котла объясняется различными условиями теплообмена между стенкой барабана и греющей средой в паровом и водяном объемах. Повышение температуры верхней части барабана происходит быстро, так как оно идет в условиях конденсации пара, а, следовательно, при высоких значениях коэффициента теплообмена. Повышение температуры нижней части барабана идет значительно медленнее, так как определяется конвективным теплообменом за счет естественной циркуляции в котле и зависит от интенсивности этой циркуляции, весьма слабой в начале растопки.

Поэтому во время пуска необходимо придерживаться режимной карты для равномерного прогрева металла барабана котла. Процесс прогрева металла барабана и увеличивает время растопки.

Еще одной причиной возникновения дополнительных напряжений в теле барабана может явиться неисправность его подвижных опор (защемление), препятствующая его свободным перемещениям при возникновении тепловых расширений.

Нарушения правил пуска барабанных котлов приводят к значительным повреждениям барабанов. Типичными повреждениями барабанов являются трещины около трубных отверстий и в штуцерах. Установлено, что одной из

главных причин повреждаемости были дефекты металла, недостатки технологии изготовления и термообработки барабанов, которые проявились при частых переменных режимах и нарушениях нормальной эксплуатации, заключающихся в систематических отклонениях от рекомендуемой процедуры заполнения барабанов водой, а также в превышениях допустимой скорости увеличения температуры насыщения при последующих пусках котлов.

Наиболее характерными повреждениями на цилиндрической части и в днищах барабанов паровых котлов высокого давления в эксплуатации являются:

- трещины: в районе отверстий (преимущественно радиальные), выходящие на внутреннюю поверхность обечайки и отверстия; преимущественно параллельные образующим барабана и расположенные около отверстий и на неослабленных участках, в основном в нижней части барабана; на поверхности отверстий и под вальцованными соединениями; около швов приварки кронштейнов крепления внутрибарабанных устройств; около швов приварки лапы затвора лаза; на внутренней поверхности в местах отбортовки штампованных днищ; в местах приварки заводских монтажных деталей; кольцевые у шва приварки кольца укрепления кромки лаза;

- коррозионные разъедания обечаек и днищ барабанов;

- язвы, цепочки язв и раковины на наружной и внутренней поверхностях обечаек и днища;

- расслоения в листах, в том числе выходящие на поверхность барабана и днища.

Основные недостатки барабанного метода сепарации пара:

- высокая металлоёмкость барабана;

- высокая теплоёмкость барабана;

- из-за сравнительно низкой теплопроводности стенки, из-за большой толщины стенки барабана происходит неравномерный прогрев внутренних и внешних поверхностей металла стенки, что вызывает дополнительные деформации;

- большие габариты барабана;

- появление внутренних напряжений при неравномерном нагреве;

- требует длительного времени прогрева металла барабана во время растопки;

- более сложный в изготовлении и проведении ремонта.

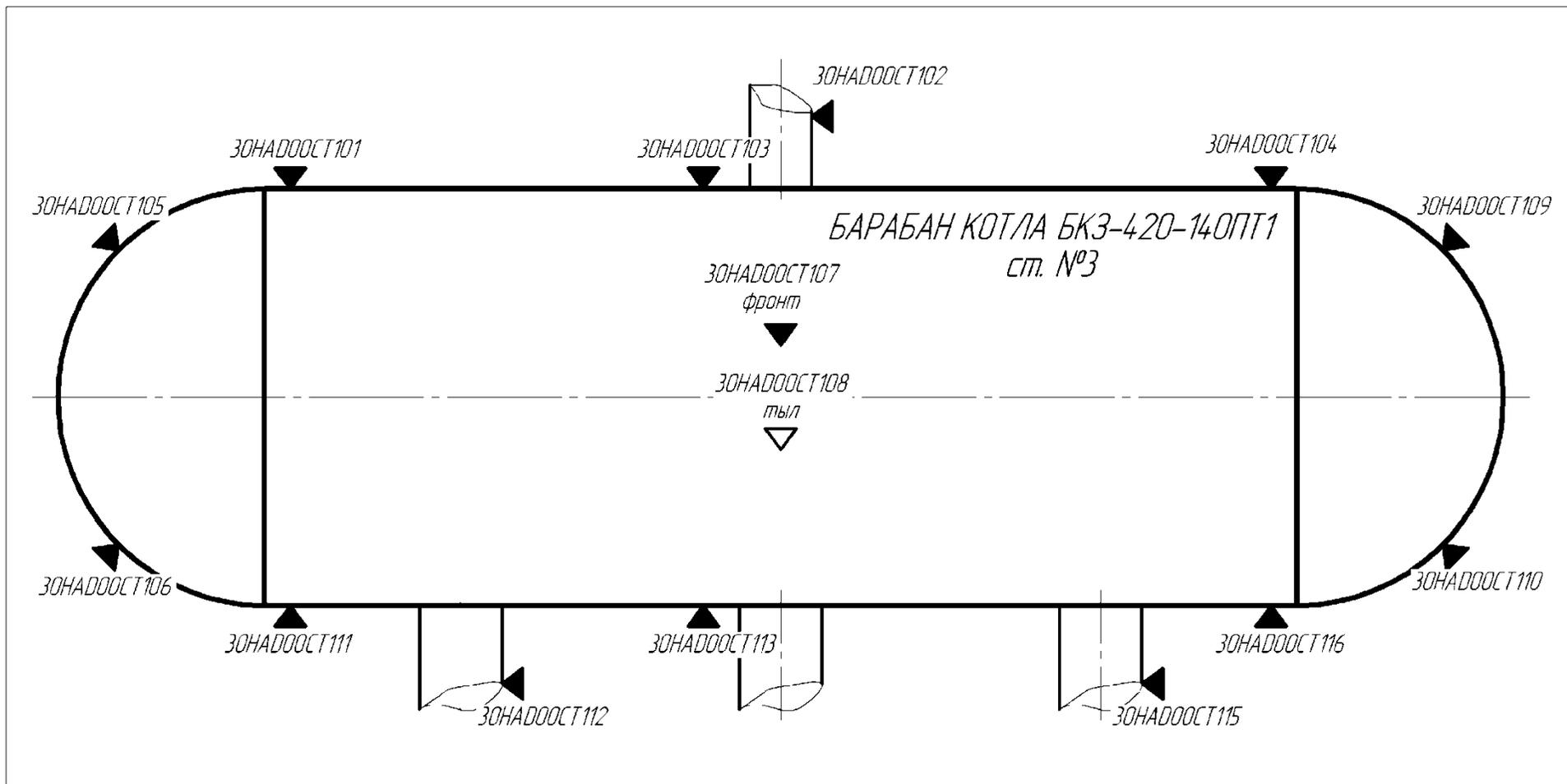


Рисунок 3.2 Места расположения точек контроля температуры (датчиков температуры) металла барабана котла №3.

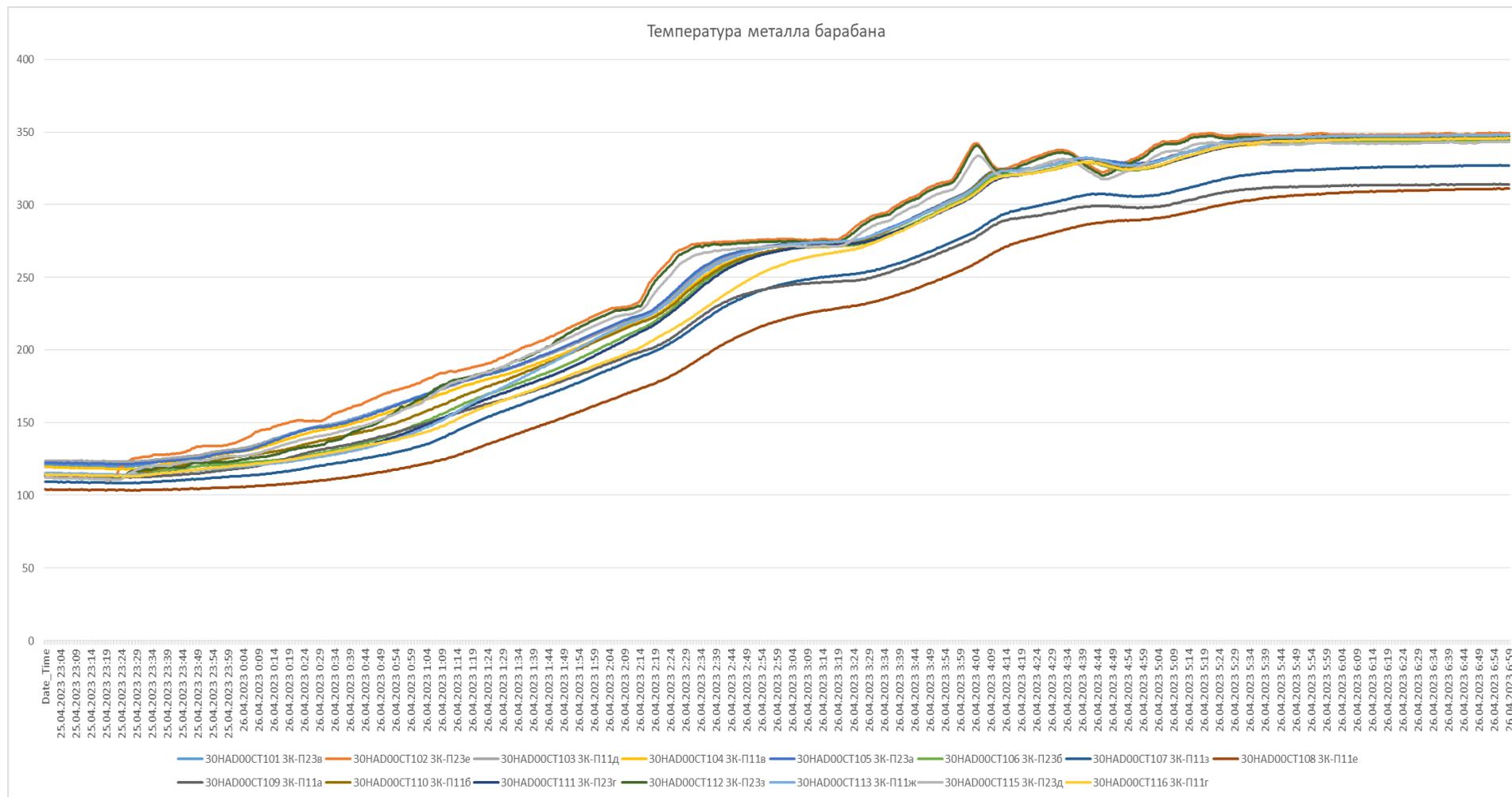


Рисунок 3.3 Графики изменения температуры металла барабана во время растопки котла №3 из холодного состояния.

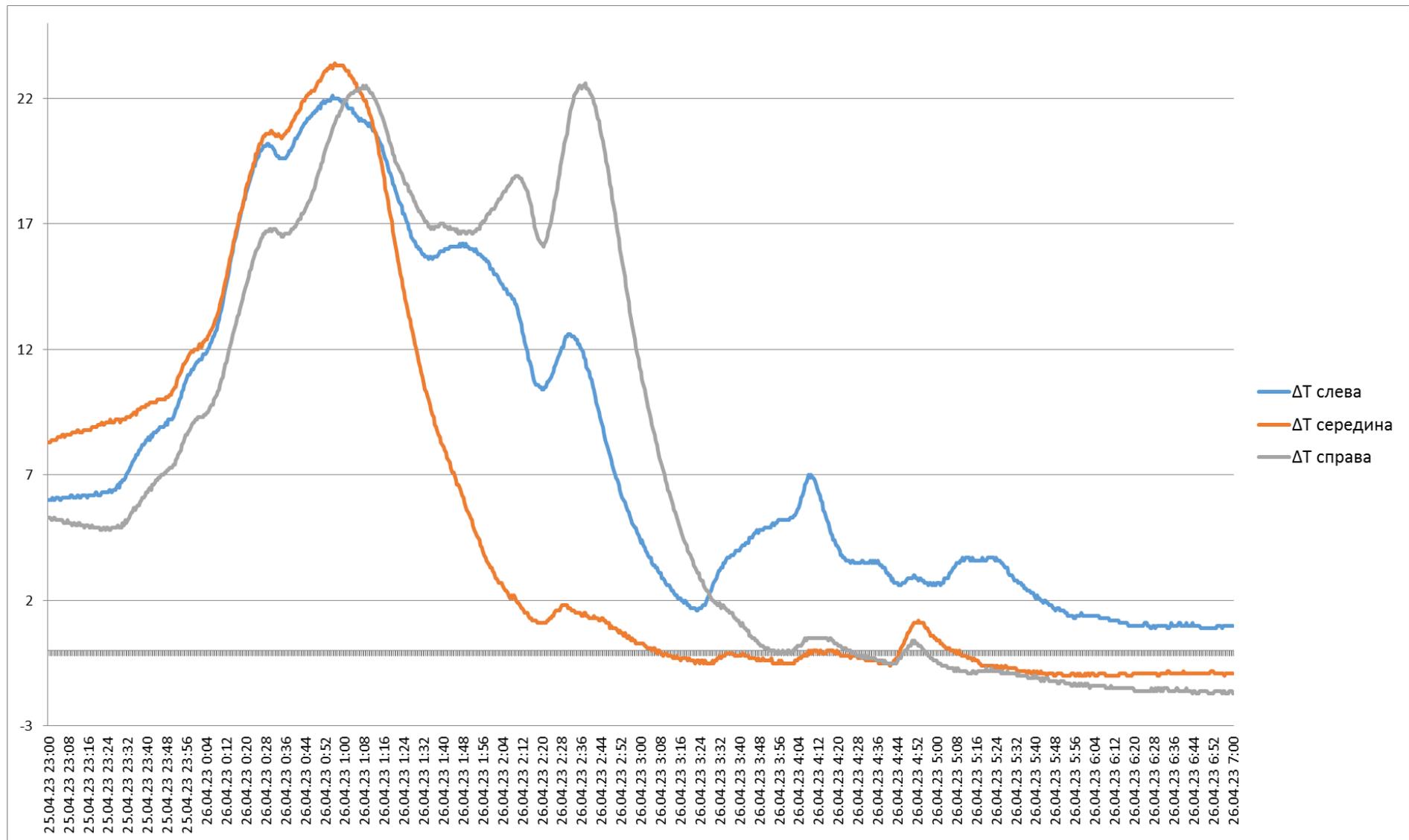


Рисунок 3.4. Графики изменения разницы температуры металла верх/низ барабана во время растопки котла №3 из холодного состояния.

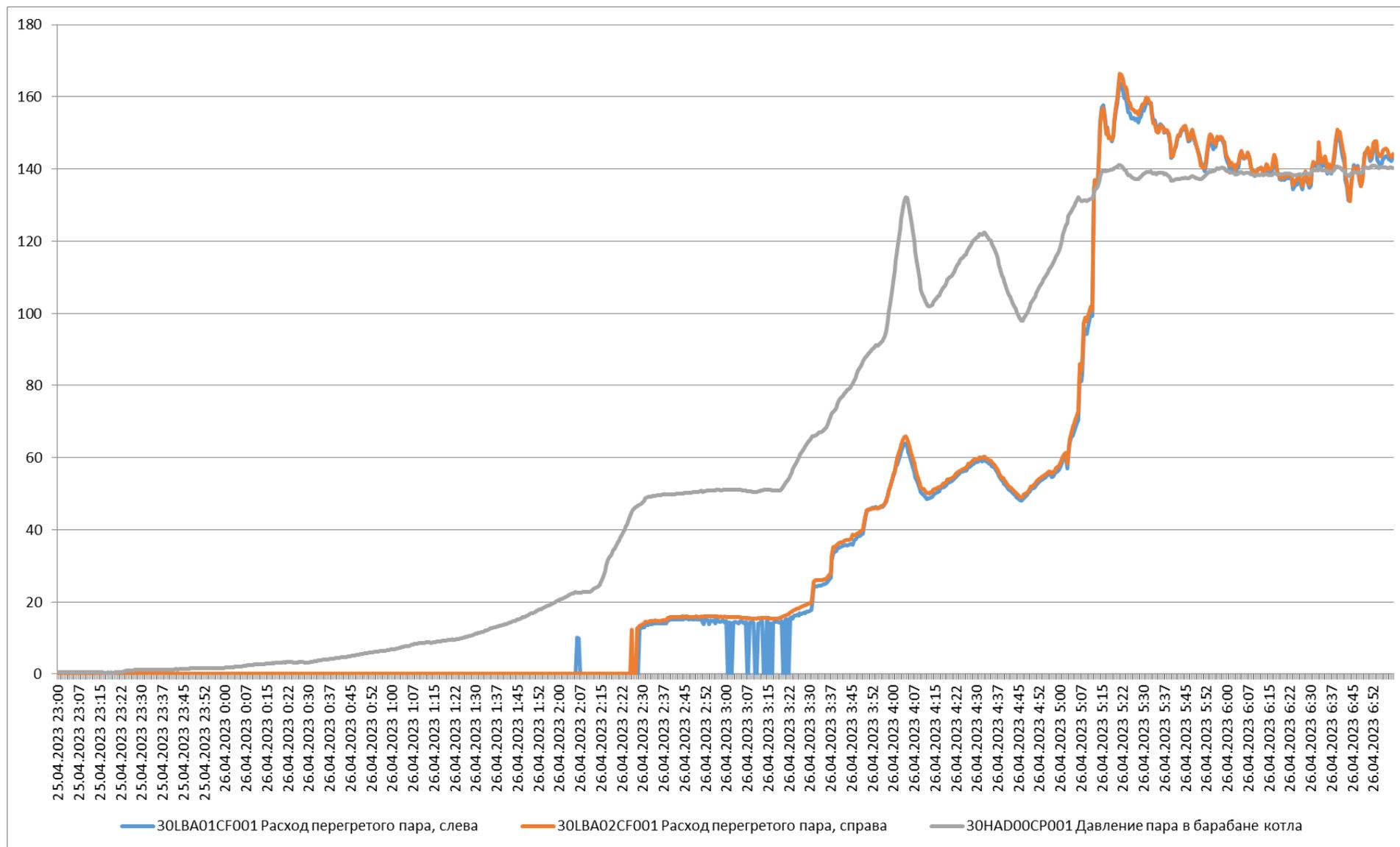


Рисунок 3.5 Графики изменения расхода пара (слева и справа) и давления пара в барабане во время растопки котла №3 из холодного состояния.

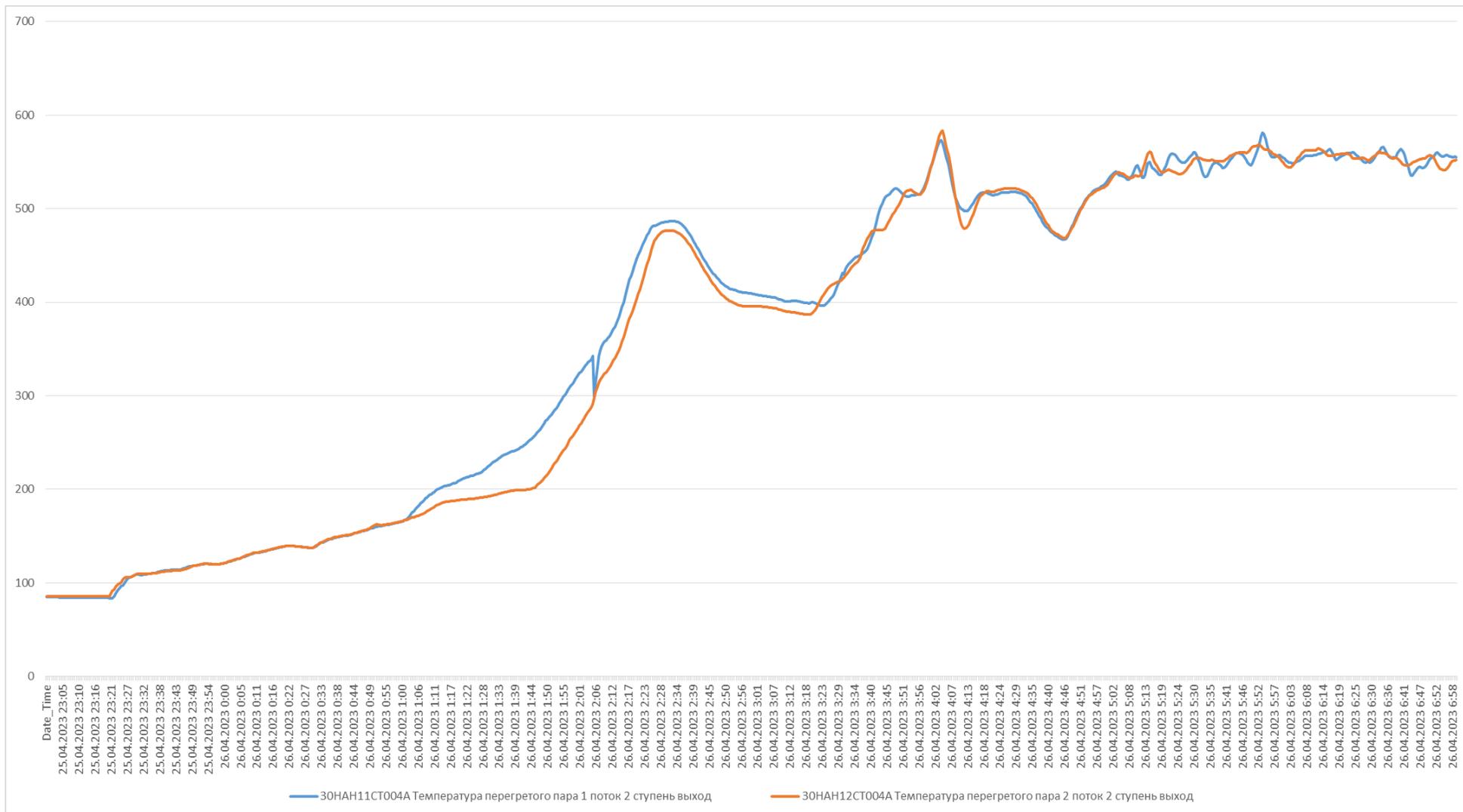


Рисунок 3.6 Графики изменения температуры пара слева и справа во время растопки котла №3 из холодного состояния.

Преимущества барабанного метода сепарации пара:

Основные преимущества барабанного метода сепарации пара:

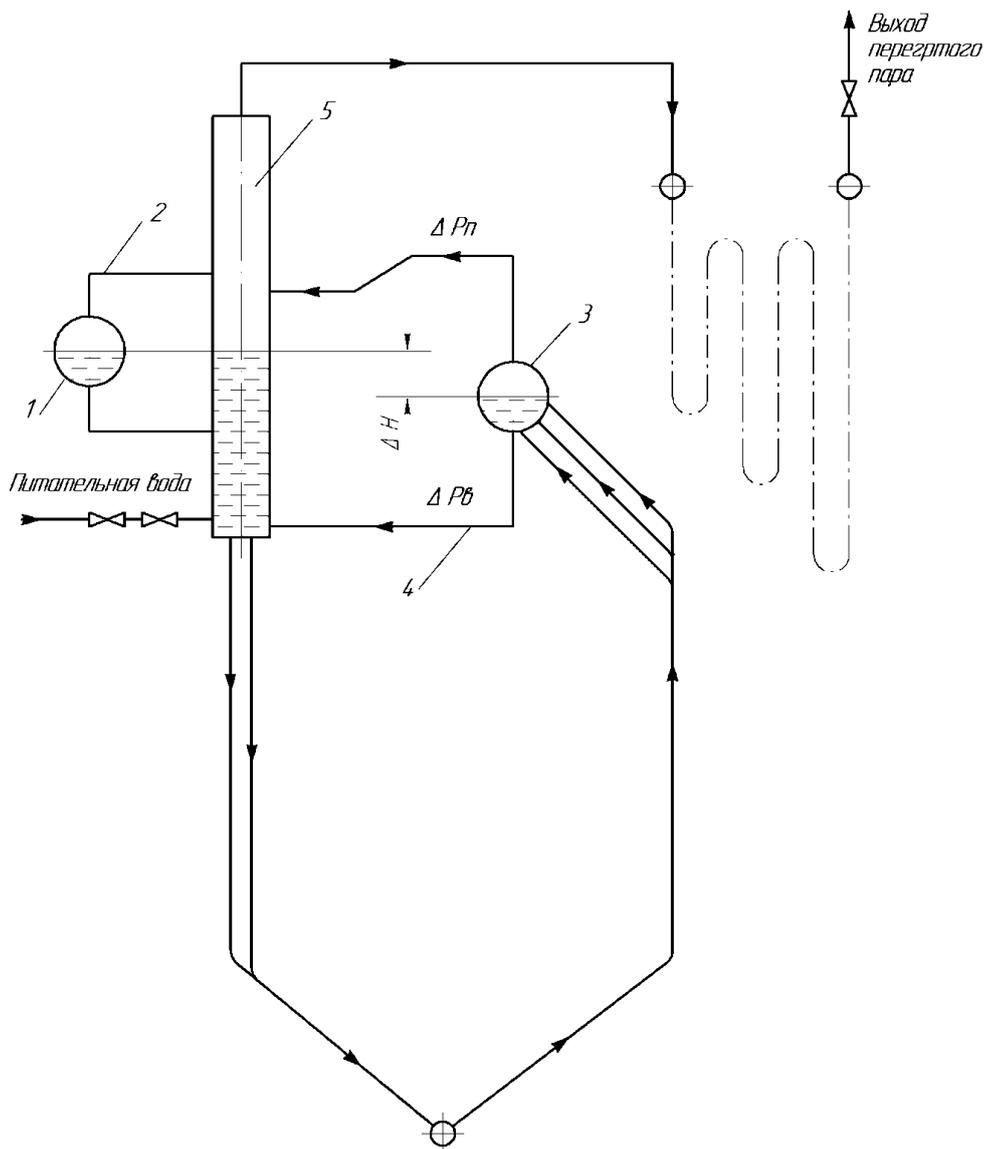
- большой опыт применения в составе паровых котлов;
- высокое качество сепарации пара;
- простая схема циркуляции;
- более надёжен в период гарантированного срока эксплуатации;
- имеет запас резервного количества воды, на случай аварийной ситуации;
- простота регулировки уровня воды.

3.2 Метод безбарабанной сепарации пара

Схемы котлов с вертикальными сепараторами неоднократно предлагались различными учёными, в том числе и Михаилом Адольфовичем Стыриковичем это советский учёный-теплоэнергетик, академик Академии наук СССР (16.11.1902 - 27.10.1995). Одна из его схем сепарации пара показана на рисунке 3.7.

В водотрубном паровом безбарабанном котле с горизонтальным или вертикальным расположением кипяtilьных труб функции барабана, где происходит разделение пароводяной смеси на воду и на пар, выполняют вертикальные сепараторы пара, или так называемые выносные циклоны.

Рассматриваемая схема безбарабанного водотрубного парового котла с естественной циркуляцией имеет ряд отличий и преимуществ по сравнению с обычными барабанными котлами. В котле применяются несколько высокоэффективных центробежных сепараторов, обеспечивающих надёжную сепарацию пара от воды. Все выносные циклоны соединены с помощью труб с системой горизонтальных коллекторов с целью обеспечения необходимого объёма воды для предотвращения значительных колебаний уровня и бросков при неустановившихся режимах работы котла. В котле применены верхние разделительные коллекторы экранов и котельных пучков, связанные с системой нижних перепускных труб с водяными объёмами циклонов, с целью снижения водосодержания пароводяной смеси, поступающим по отводящим трубам в паровой объём циклона. Это мероприятие, аналогичное применению циркуляционных труб, при соответствующем развитии опускных труб, позволяет значительно повысить скорость входа воды в экранные трубы



- 1 – Уравнительные ёмкости;
- 2 – Уравнительные трубы;
- 3 – Верхние разделительные коллекторы;
- 4 - Рециркуляционные трубы;
- 5 – Выносные циклоны.

Рисунок 3.7 Схема коллекторного котла с выносными циклонами.

В соответствии с указанной схемой был разработан проект безбарabanного котла с естественной циркуляцией производительностью 7 т/ч на давление 25 ата, рисунок 3.8. Несколько таких котлов в 1956 г. были построены и установлены на одном из промышленных предприятий.

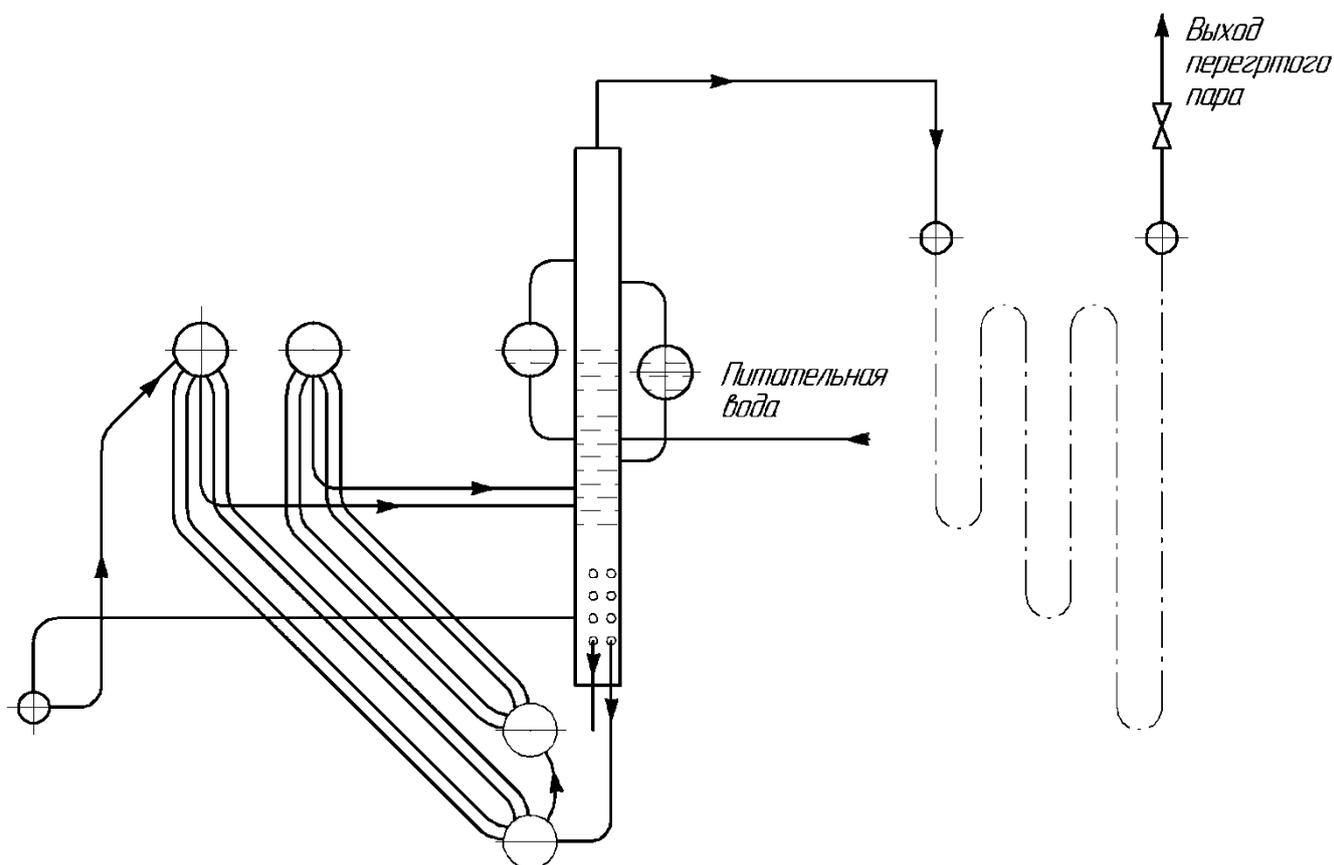


Рисунок 3.8. Циркуляционная и сепарационная схемы безбаранного котла с естественной циркуляцией.

Для стабилизации положения уровня котловой воды в выносных циклонах и увеличения водяного компенсационного объёма в верхней части этого котла установлены две горизонтальные уравнивательные ёмкости из труб диаметром 426x12 мм длиной 3500 мм. Указанные ёмкости выключены из общего циркуляционного потока и связаны с выносными циклонами дыхательными паровыми и водяными трубами. Как показала практика работы этих безбаранных котлов, применение горизонтальных уравнивательных ёмкостей обеспечивает необходимую стабилизацию положения уровня воды при нормальной работе котла и, кроме того, создаёт достаточный запас питательной воды, который может быть полностью использован при аварийном прекращении работы питательных насосов. Практика эксплуатации безбаранных котлов полностью подтвердила, что перевод основного объёма воды из горизонтальных верхних барабанов, имеющих в обычных паровых котлах, в вертикальные стояки делает этот тип котла высоконадёжным в части циркуляции, особенно при упусках воды. Вода из верхней части водяного объёма безбаранного котла может быть безаварийно сработана на высоте 2000 мм от оси верхней уравнивательной ёмкости. Величина водяного объёма только уравнивательных ёмкостей данного котла при полном прекращении

подачи воды питательными насосами обеспечивает возможность работы котла с паропроизводительностью $D=7,0$ т/ч в течение 9,5 мин. Это является показателем высокой эксплуатационной надёжности циркуляционной системы безбаранного котла. [1]

В настоящее время безбаранные парообразующие контуры с естественных циркуляций успешно применяются в новых комбинированных водогрейных агрегатах, построенных Дорогобужским котельным заводом на базе серийных водогрейных котлов. Безбаранная схема, хорошо проверенная в результате успешной безаварийной работы промышленных котлов в течении многих лет, может быть в настоящее время рекомендована к широкому применению при постройке серийных промышленных котлов малой и большой мощности. В мощных котлах повышенного и высокого давления с естественной циркуляцией при применении безбаранных схем обеспечивается значительная экономия металла за счёт уменьшения толщины стенок выносных циклонов и уравнильных ёмкостей по сравнению с толщиной стенок барабанов большого диаметра: кроме того, обеспечивается высокая манёвренность и быстрота прогрева и пуска таких агрегатов при сохранении в них обычной естественной циркуляции.

3.3 Преимущества и недостатки метода безбаранной сепарации пара

Применение на паровом котле безбаранной схемы сепарации пара позволит:

- уменьшить стоимость изготовления парового котла в первую очередь это связано с отказом от использования барабана. Так как изготовление барабана котла является, наиболее сложным и трудоёмким процессом во всём котлостроении. Требуется применения громоздких и дорогостоящих станков, огромных помещений цехов в которых они расположены, а также затрат энергии на их привод. Изготовление сепарационных устройств меньших габаритов технологически намного проще. В качестве заготовки для корпуса сепарационного устройства может быть использована стальная цельнотянутая или сварная труба стандартного диаметра;

- уменьшение времени растопки котла достигается за счёт быстрого разогрева сепарационных устройств, что вызвано меньшей металлоёмкостью, температурным сопротивлением стенки сепаратора и меньшими температурными деформациями, возникающими в металле;

- увеличить надёжность. За счёт больших геометрических размеров барабана процесс деградации механических свойств металла протекает более интенсивно и в результате происходит постепенное накопление повреждений

под действием переменных (часто циклических) напряжений с образованием и развитием трещин. Таким образом, использование в работе отдельно расположенных сепарационных устройств надёжнее барабана, так как подвергаются меньшим температурным изменениям линейных размеров, для компенсации которых достаточно одной степени свободы вдоль вертикальной оси;

- снизить расходы топлива, электрической и тепловой энергии на проведение растопки котла;

- снизить количество вредных выбросов в воздушный бассейн во время растопки, за счёт уменьшения количества сжигаемого топлива используемого на растопку котла;

- исключить необходимость парового разогрева барабана котла перед пуском;

- обеспечить простоту в обслуживании, лёгкость в ремонте и замене.

Преимущества применения безбарабанного метода сепарации пара могут заинтересовать не только организации, занимающиеся эксплуатацией паровых котлов, но и конструкторов, занятых в индустрии котлостроения.

Недостатки применения безбарабанного метода сепарации пара:

- отсутствие опыта применения в составе паровых котлов высокого давления;

- наличие сложной циркуляционной схемы;

- необходимость применения нескольких узлов питания котла и автоматических регуляторов уровня воды в сепарационных устройствах.

Сравнительный анализ двух методов сепарации с использованием барабана и безбарабанного показан в таблице 5.

3.4 Сравнительный анализ двух методов сепарации пара

В представленной магистерской диссертации впервые проводится изучение возможности применения безбарабанного метода разделения пара и котловой воды на паровых котлах с естественной циркуляцией высокого давления. В данной работе будут рассмотрены несколько возможных способов реализации этой идеи. Но все они, так или иначе, приведут к изменению схемы циркуляции котла. Основная суть этих изменений — это использование вместо барабана отдельно расположенных сепарационных устройств выполняющих функции отделения пара от воды, очистки пара и обеспечения запаса воды в котле.

В таблице 3.1 рассмотрены основные достоинства и недостатки предлагаемого метода безбарабанной сепарации пара в сравнении с барабанным.

Более детальные исследования применения безбарабанного метода на паровых котлах высокого давления будут проведены с помощью математического моделирования. Кроме того, будут рассмотрены варианты реализации метода на паровом котле БКЗ-420-140ПТ1.

Таблица 3.1 - Сравнительный анализ двух методов сепарации пара

Критерий оценки	Барабанный котёл	Безбарабанная схема сепарации пара
Время растопки	Сократить время растопки не позволяют температурные деформации, возникающие в металле барабана.	Меньше, за счёт меньших габаритов и меньших возникающих температурных деформаций.
Затраты топлива на растопку котла.	Количество использованного топлива на растопку определяется временем прогрева металла барабана и труб поверхностей нагрева.	Меньше, за счёт меньшего времени растопки.
Затраты электрической и тепловой энергии на растопку котла	Количество использованной энергии на растопку определяется временем прогрева металла барабана и труб поверхностей нагрева.	Меньше, за счёт меньшего времени растопки. Отсутствие парового разогрева.
Сложность изготовления	Технологически сложен в изготовлении, процесс изготовления требует наличия специального оборудования.	Проще в изготовлении за счёт меньших габаритов и меньшей металлоёмкости.
Металлоёмкость	Высокая. За счет габаритов барабана и толщины его стенки.	Меньше, за счет за счёт меньших габаритов и возникающих температурных деформаций.
Выполнение ремонта и технического обслуживания	Проведение ремонта или дефектоскопии в внутри барабана крайне затруднено. Необходим демонтаж внутрибарабанных сепарационных устройств.	Ремонтопригодность выше, за счёт меньших габаритов сепаратора, возможности его демонтажа и наличия доступа для обслуживания или проведения ремонта.
Срок эксплуатации	Большой, за счёт толщины стенки барабана.	Большой, за счет меньших температурных деформаций возникающих в металле.

Продолжение таблицы 3.1 - Сравнительный анализ двух методов сепарации пара

Критерий оценки	Барабанный метод сепарации пара	Безбарабанный метод сепарации пара
Качество сепарации пара	Высокое, за счёт наличия трёх типов внутрибарабанных устройств для сепарации и промывки пара.	Высокое, за счёт большей высоты между пароотводящим патрубком и уровнем воды.
Надёжность	Разработаны различные методы повышения надёжности в течение установленного срока эксплуатации барабана.	В металле отдельного сепаратора возникают меньшие температурные напряжения. Вероятность возникновения дефекта в структуре металла ниже.
Наличие запаса резервного количества воды	Имеется в нутрии объёма барабана.	Необходимо наличие дополнительной ёмкости.
Стоимость парового котла	Высокая, за счёт изготовления массивного тела барабана.	Ниже, за счёт более простого изготовления сепарационных устройств. Толщина стенки, и габариты меньше.
Наличие опыта использования на котлах высокого давления	Большой опыт использования на барабанных котлах.	Отсутствует.
Регулирование уровня котловой воды	Регулирование осуществляется при помощи регулирующей арматуры входящей в состав узла питания котла.	Таблица 5. Сравнительный анализ двух методов сепарации.
Циркуляционная схема	Простая, функцию сбора пара и распределения воды по контурам циркуляции выполняет барабан котла.	Сложная, необходимо параллельное включение нескольких сепарационных устройств, как по пару, так и по воде. Обеспечить одинаковый уровень в сепараторах.

4. Тепловой расчёт котла

В этой главе выполнен поверочный расчёт котла БКЗ-420-140ПТ1 по существующим конструкции и размерам котла для заданных нагрузок и вида топлива. В расчёте определяется температура воды, пара, воздуха и газов на границах между отдельными поверхностями нагрева, коэффициент полезного действия, расход топлива, расход и скорости пара, воздуха и дымовых газов.

Поверочный расчет выполнен для оценки показателей экономичности и надежности котла при работе на заданном топливе, выявления необходимых мероприятий и получения исходных материалов для проведения гидравлического, расчёта.

Полученные результаты теплового расчёта в дальнейшем будут использованы для выполнения гидравлического расчёта контуров циркуляции.

Для выполнения поверочного расчета котлоагрегата необходимо знать его производительность, давление и температуру перегретого пара и питательной воды, а также марку и элементный состав топлива. Данные для выполнения расчёта указаны в таблицах 4.1; 4.2.

Кроме этого известны геометрические размеры поверхностей нагрева и конструкции котлоагрегата в целом. Особенность поверочного расчета в том, что температура уходящих газов и горячего воздуха неизвестна, а, следовательно, потеря тепла q_2 и КПД котлоагрегата. Поэтому эти параметры были предварительно заданы, а по окончании расчета были определены их расчётные значения.

Основным методом, поверочного расчета является метод последовательных приближений при расчете отдельных поверхностей нагрева и метод параллельных расчетов при значительном несовпадении определенной величины по сравнению с принятым её значением.

В тепловом расчёте котла выполнено:

- Определение избытка воздуха и присосов по газовому тракту котла, таблица 4.3.;
- Расчёт объёма воздуха для горения и продуктов сгорания, таблица 4.3;
- Расчёт состава и теплосодержания продуктов сгорания, таблица 4.5;
- Составлен тепловой баланс котла, 4.9;
- Выполнен поверочный расчёт топочной камеры, таблица 4.11;
- Выполнен поверочный расчёт 2 и 3 ступеней пароперегревателя, таблица 4.12;
- Выполнен поверочный расчёт 1 и 4 ступеней пароперегревателя, таблица 4.13;
- Выполнен поверочный расчёт 1 и 2 ступени водяного экономайзера и воздухоподогревателя, таблица 4.14;

Расчёт проводился с помощью системы компьютерной алгебры – Mathcad и программы для работы с электронными таблицами – Excel входящей в состав программного комплекса Microsoft Office.

Тепловой расчёт котла выполнен по методике указанной в [7].

4.1 Исходные данные для расчёта

Таблица 4.1 - Технические характеристики котла

Наименование	Обозн.	Значение
Производительность, кг/час	D	420000
Давление пара в барабане, кгс/см ²	P _Б	156
Давление пара за задвижкой, кгс/см ²	P _{ПП}	140
Температура питательной воды, °С	t _{ПВ}	230
Теплосодержание питательной воды	i _{ПВ}	237,1
Температура насыщения, °С	t _{НАС}	344
Теплосодержание насыщенного пара, ккал/кг	i _{НП}	6216
Температура перегретого пара, °С	t _{ПП}	560
Теплосодержание перегретого пара, ккал/кг	i _{ПП}	833,2
Удельный объём насыщенного пара, м ³ /кг	V _{НП}	0,01008
Удельный объём перегретого пара, м ³ /кг	V _{ПП}	0,0257
Температура холодного воздуха, °С	t _{ХВ}	30
Температура уходящих газов, °С	t _{УХ}	147
Теплосодержание воды при кипении, ккал/кг	i _{КИП}	387,4
Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель, °С	t _{КФ}	30
Температура воды впрыскиваемой в парохладитель, °С	t _{ВПР}	344

4.2 Элементный состав топлива

Элементный состав Ирша-Бородинского бурого угля Б2Р применяемый в качестве топлива для парового котла БКЗ-420-140ПТ1 показан в таблице 3.2.

Таблица 4.2 - Элементарный состав Ирша-Бородинского бурого угля и его низшая теплота по рабочей массе

Наименование	Обозн.	Значение
Углерод, %	C_p	43,7
Водород, %	H_p	3
Кислород, %	O_p	13,5
Азот, %	N_p	0,6
Сера, %	S_p	0,2
Влажность, %	W_p	33
Зола, %	A_p	6
Низшая теплота сгорания, ккал/кг	Q_H^P	3740
Выход летучих, %	V_p	48
Теплота сгорания, кКал/кг	Q_P^P	3795
Коэффициент размолоспособности	$K_{ЛЮ}$	1,15
Температурные характеристики золы	t_1	1180
	t_2	1210
	t_3	1230

4.3 Воздух и продукты горения

Таблица 4.3 - Теоретическое количество воздуха и продуктов сгорания

Наименование	Обозн.	Значение
Теоретическое количество воздуха необходимое для полного сгорания топлива	V^0	4,24
Теоретические объёмы продуктов сгорания:		
- азота,	V^0N_2	3,35
- трёхатомных газов,	V_{RO_2}	0,82
- водяных паров,	$V^0_{H_2O}$	0,81

4.4 Результаты теплового расчёта

Таблица 4.4 - Температура дымовых газов, воды и пара

Наименование	Обозн.	Значение
Температура газов на выходе из топки, °С	ϑ''_T	1124
Температура газов за II ступенью пароперегревателя, °С	ϑ''_{CT2}	1021
То же за III ст. пароперегревателя, °С	ϑ''_{CT3}	846
То же за IV ст. пароперегревателя, °С	ϑ''_{CT4}	872
То же за I ст. пароперегревателя, °С	ϑ''_{CT1}	698
То же за II ст. экономайзера, °С	$t_{ЭК2}$	421
То же за II ст. воздухоподогревателя, °С	$t_{ВП2}$	333
То же за I ст. экономайзера, °С	$t_{ЭК1}$	255
То же за I ст. воздухоподогревателя, °С	$t_{ВП1}$	147
Температура пара за I ст. пароперегревателя, °С	t''_{CT1}	405
То же за II ст. пароперегревателя, °С	t''_{CT2}	493
То же за III ст. пароперегревателя, °С	t''_{CT3}	534
То же за IV ст. пароперегревателя, °С	t''_{CT4}	560
Температура воды за I ст. экономайзера, °С	$t^{ЭК}_{CT1}$	258
Температура воды за II ст. экономайзера, °С	$t^{ЭК}_{CT2}$	342
Температура воздуха за II ст. ступенью воздухоподогревателя, °С	$t^{ВП}_{CT2}$	366
То же за I ст. ступенью воздухоподогревателя, °С	$t^{ВП}_{CT1}$	230
Температура газов на входе в поворотную камеру, °С	$T^{Bx}_{ПК}$	649

Таблица 4.5 - Объемы продуктов сгорания, объемные доли трехатомных газов и концентрация золовых частиц

Наименование	Обозн.	Значение
Объем дымовых газов, м ³ /кг	$V^0_{Г}$	4,97932549
Теоретический объем воздуха, м ³ /кг	$V^0_{В}$	4,2370475
Объем водяных паров, м ³ /кг	V^0_{H2O}	0,810416465
Объемная доля трёхатомных газов	V_{RO2}	0,8168415
Объем азота	V^0_{N2}	3,352067525
Доля уноса золы из топки, для жидкого шлакоудаления	$\alpha_{УН}$	0,8

Таблица 4.6 - Объемы продуктов сгорания, объемные доли трехатомных газов и концентрация золовых частиц (макет)

Наименование и обозначение параметра	Газоход						
	Топочная камера и 2я ст. ПП	3я и 4я ст. ПП	1я ст. ПП	ВЭК 2я ст.	ВЗП 2я ст.	ВЭК 1я ст.	ВЗП 1я ст.
Коэффициент избытка воздуха за поверхностью нагрева	1,2	1,225	1,25	1,27	1,3	1,32	1,35
Средний коэффициент избытка воздуха в поверхности нагрева	1,2	1,2125	1,2375	1,26	1,285	1,31	1,335
Объем водяных паров,	0,8241	0,8249	0,8266	0,8282	0,8299	0,8316	0,8333
Полный объем газов, м ³ /кг	5,8403	5,8941	6,0017	6,0986	6,2062	6,3138	6,4214
Объемная доля трехатомных газов γ_{RO_2}	0,1399	0,1386	0,1361	0,1339	0,1316	0,1294	0,1272
Объемная доля водяных паров $\gamma_{\text{H}_2\text{O}}$	0,1388	0,1375	0,1350	0,1329	0,1306	0,1284	0,1262
Суммарная объемная доля $\gamma_{\text{П}}$	0,2786	0,2761	0,2711	0,2668	0,2622	0,2577	0,2534
Масса дымовых газов, кг/кг	7,5803	7,6495	7,7878	7,9123	8,0507	8,1890	8,3273
Концентрация золовых частиц, $\mu\text{ЗЛ}$, кг/кг	0,0063	0,0063	0,0062	0,0061	0,0060	0,0059	0,0058

Таблица 4.7 - Энтальпии продуктов сгорания, кДж/кг (макет)

θ, °С	$H_{Г}^0$ (α=1)	$H_{В}^0$ (β _В =1)	$H_{Г}^{PC}$	$H_{Г} = H_{Г}^0 + (α-1)H_{В}^0 + 0,1H_{Г}^{PC}$						
				Топочная камера, 2я ст. (по α _Г)	3 и 4 ст. ПП (по α'' _{ширм})	1ст. КПП (по α'' _{ПП})	ВЭК2 (по α'' _{ВЭК})	ВЗП2 (по α'' _{ВЗП})	ВЭК1 (по α'' _{ВЭК})	ВЗП1 (по α'' _{ВЗП})
100	683,50	555,73	893,78							967,386
200	1395,00	1124,31	1802,53						1935,030	1968,759
300	2132,46	1705,46	2738,64					2917,958	2952,067	3003,231
400	2893,92	2298,87	3699,63				3884,58	3953,547	3999,524	4068,490
500	3677,54	2904,17	4682,96			4871,88	4929,96	5017,088	5075,171	
600	4481,53	3520,94	5686,13			5930,38	6000,80	6106,431		
700	5304,22	4148,73	6706,62		6908,34	7012,06	7095,04			
800	6144,00	4786,99	7741,91		7995,26	8114,94				
900	6999,36	5435,18	8789,50	8965,34	9101,22	9237,10				
1000	7868,88	6092,65	9846,87	10072,10	10224,41	10376,73				
1100	8751,23	6758,75	10911,51	11194,13	11363,10					
1200	9645,16	7432,75	11980,89	12329,80						
1300	10549,51	8113,88	13052,52	13477,54						
1400	11463,21	8801,31	14123,86							
1500	12385,28	9494,16	15192,42							
1600	13314,83	10191,51	16255,67							
1700	14251,04	10892,38	17311,11							
1800	15193,19	11595,75	18356,21							
1900	16140,66	12300,53	19388,46							

Таблица 4.8 - Средняя теплоемкость воздуха, газов, водяных паров (кДж/(м³·К)) и золы (кДж/(кг·К))

θ, °С	C _B	C _{RO2}	C _{N2}	C _{H2O}	C _{зл}
100	1,3198	1,601	1,2955	1,4954	0,808
200	1,3253	1,7016	1,2968	1,5063	0,8455
300	1,3328	1,7887	1,3006	1,5235	0,879
400	1,3555	1,9312	1,3173	1,5666	0,9
500	1,3693	1,9902	1,3286	1,5909	0,9168
600	1,384	2,0426	1,3412	1,6161	0,9335
700	1,3986	2,09	1,3546	1,6425	0,946
800	1,4124	2,1327	1,368	1,6693	0,9586
900	1,4259	2,1708	1,3806	1,6969	0,9721
1000	1,4384	2,2052	1,3928	1,7242	0,9837
1100	1,4594	2,2366	1,4045	1,7514	0,997
1200	1,4623	2,2655	1,4154	1,7782	1,0055
1300	1,4736	2,2915	1,4263	1,8042	1,0465
1400	1,4841	2,3154	1,4359	1,8293	1,1302
1500	1,4937	2,3372	1,4451	1,8541	1,172
1600	1,5029	2,3573	1,4539	1,8775	1,1929
1700	1,5113	2,3761	1,4623	1,901	1,2139
1800	1,5189	2,3933	1,4698	1,9228	1,2348
1800	1,5189	2,3933	1,4698	1,9228	1,2348
1900	1,5268	2,4092	1,477	1,9437	1,2557
2000	1,534	2,4239	1,4837	1,9643	1,2578
2100	1,5411	2,4377	1,4904	1,984	1,26
2200	1,5474	2,4503	1,4962	2,0024	
2300	1,5536	2,462	1,5021	2,0204	

Таблица 4.9 - Потери и КПД котла

Наименование	Обозн.	Значение
Потери теплоты с уходящими газами, %	q ₂	7,57
Потери теплоты с химическим недожогом, %	q ₃	0
Потери теплоты с механическим недожогом, %	q ₄	0,5
Потери теплоты в окружающую среду, %	q ₅	0,347
Потери теплоты с физическим теплом шлака, %	q ₆	0,11
Суммарные потери:		8,53
КПД котла брутто, %	η ^{BP} _{КА}	91,47

Таблица 4.10 - Расход топлива

Наименование	Обозн.	Значение
Полный расход топлива V , кг/сек,	V	20,049
Расчётный расход сгоревшего топлива, V_p кг/сек.	V_p	19,949

Таблица 4.11 - Результат теплового расчёта топочной камеры

Наименование	Обозн.	Значение
Площадь стен топки, m^2	F_{CT}	1236
Объём топки, m^3	V_T	2032
Теплонапряжение объёма, $кВт/м^3$	qv	157,36
Толщина излучающего слоя, м	S_T	5,92
Температуры газов на выходе из топки, $^{\circ}C$	ϑ''_T	1124
Теплота горячего воздуха, $кДж/кг$	Q_B	2220,96
Тепловыделение в топочной камере	Q_T	18104,12
Адиабатная температура в топке,	ϑ_a	1642,00
Коэффициент поглощения лучей газами	k_T	3,2790
Коэффициент поглощения лучей золой	$k_{ЗЛ}$	68,0371
Критерий Бугера	B_u	1,0916
Эффективное значение критерия Бугера $B_{\tilde{u}}$	$B_{\tilde{u}}$	0,9820
Степень черноты факела	α_{ϕ}	0,5554
Среднее значение тепловой эффективности	ψ_{cp}	0,3465
Степень черноты топочной камеры	α_T	0,7828
Средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания, $кДж/кг$	$(V_C)_{cp}$	12,9206
Уточнение температуры газов на выходе из топочной камеры, $^{\circ}C$	ϑ''_T	1124,00
Энтальпия продуктов сгорания топлива на выходе из топки, $кДж/кг$	H''_T	11465,51
Количество теплоты, переданное от газов к поверхностям топки, $кДж/кг$	Q_L	6613,33
Среднее тепловое напряжение экранов топки $кВт/м^2$.	q_L	108,92

Таблица 4.12 - Результат теплового расчёта 2 и 3 ступеней пароперегревателя

Наименование	Обозн.	Значение	
		2 ст.	3 ст.
Ширина пароперегревателя, м	B	1,702	1,25
Высота пароперегревателя, м	A	9,6	7,32
Зазор между лентами, м	ΔB_{III}	0,15	0,15
Наружный диаметр труб, м	d_H	0,032	0,032
Внутренний диаметр труб, м	d_{BH}	0,024	0,022
Шаг между соседними пароперегревателями, м	S_1	0,565	0,24
Продольный шаг труб в ленте ширмы, м	S_2	0,038	0,05
Число пакетов в одной ступени по ширине газохода, шт.	Z_1	24	32
Число паралельно включенных труб в одной ленте, шт.	n_{III}	21	12
Площадь ступени, м ²	F_{2CT}	944	496
Сечение для прохода газов, м ²	$f_{CT}^Г$	141,5	92,27
Сечение для прохода пара, м ²	$f_{CT}^П$	0,233	0,146
Принимаем темп. пара на входе в ступень, °С	t'_{CT}	405	472
Принимаем темп. пара на выходе из ступени, °С	t''_{CT}	493,412	534
Энтальпия пара на входе, кДж/кг	h'_{CT}	2997,00	3234,3
Энтальпия пара на выходе, кДж/кг	h''_{CT}	3288,00	3414,864
Температура газов перед ступенью, °С	ϑ'_{CT}	1124,00	1021
Принимаем температура газов за ступенью, °С	ϑ''_{CT}	1021	846,4
Тепловая нагрузка на ступень, кВт/м ²	q_L	108,92	-
Тепло полученное излучением из топки, кДж/кг	Q_{BX}^L	583,48	60,12
Угловой коэффициент ступени	φ_{CT}	0,162	0,095
Эффективная толщина излучающего слоя	S_{CT}	0,731	0,353
Коэффициент поглощения лучей газами	k_G	3,546	11,033
Коэффициент поглощения лучей золой	$k_{зл}$	71,723	71,723
Критерий Бугера	Bu	0,105	0,261
Степень черноты газов ступени	α_{CT}	0,100	0,230
Тепло излучения на поверхность расположенную за ступенью, кДж/кг	$Q_{ВЫХ}^L$	148,492	-
Тепловосприятие ступени из топки или от предыдущей ступени, кДж/кг	Q_{CT}^L	434,99	60,12
Теплота, отданная газами пароперегревателю, кДж/кг	Q_{CT}^B	1155,00	962,03
Энтальпия дымовых газов за ступенью, кДж/кг	H''_{CT}	10306,50	10360,27
Температура газов за ступенью, °С	ϑ''_{CT}	1021	846,4
Скорость газов, м/сек	ω_G	4,058	5,633

Продолжение таблицы 4.12 - Результат теплового расчёта 2 и 3 ступеней пароперегревателя

Наименование	Обозн.	Значение	
		2 ст.	3 ст.
Коэффициент теплопередачи конвекцией, ккал/(ч×м ² ×К)	α_K	32,59	65,64
Средний удельный объём пара, м ³ /кг	$\nu_{\text{П}}$	0,018	0,022
Скорость пара, м/сек	$\omega_{\text{П}}$	8,38	16,67
Коэффициент теплопередачи от стенки пару, ккал/(ч×м ² ×К)	α_2	2547,15	3587,28
Температура загрязнённой стенки, °С	t_3	714,4	757,6
Коэффициент теплопередачи излучением, ккал/(ч×м ² ×К)	$\alpha_{\text{Л}}$	33,36	66,42
Коэффициент теплопередачи от газов, ккал/(ч×м ² ×К)	α_1	66,53	132,05
Коэффициент теплопередачи ступени, Вт/(ч×м ² ×К)	k	38,616	89,115
Температурный напор для ступени, °С	Δt	623,3	430,7
Количество тепла за счёт теплопередачи, кДж/кг	$Q_{\text{СТ}}^T$	1139,00	954,29
Погрешность, %	δQ	1,39	0,804
Площадь выходного окна топки, м ²	$F_{\text{Вок}}$	174,5	-
Поверхность нагрева полная, м ²	$F_{\text{Полн}}$	672	-
Расход воды на впрыск, кг/сек.	$D_{\text{ВПр}}$	7,528	7,528
Лучевоспринимающая входная поверхность ширм, м ²	$F_{\text{ВХ}}^{\text{Л}}$	156	-
Лучевоспринимающая выходная поверхность ширм, м ²	$F_{\text{ВЫХ}}^{\text{Л}}$	132,5	-

Таблица 4.13 - Результат теплового расчёта 1 и 4 ступеней пароперегревателя

Наименование	Обозн.	Значение	
		4 ст.	1 ст.
Ширина пароперегревателя, м	B	1,25	1,3
Высота пароперегревателя, м	A	7,32	2,8
Зазор между лентами, м	ΔB_{III}	0,15	-
Наружный диаметр труб, м	d_H	0,032	0,032
Внутренний диаметр труб, м	d_{BH}	0,023	0,024
Шаг между соседними пароперегревателями, м	S_1	0,24	0,087
Продольный шаг труб в ленте ширмы, м	S_2	0,05	0,0616
Число пакетов в одной ступени по ширине газохода, шт.	Z_1	28	358
Число труб по глубине, шт.	Z_2		18
Число параллельно включённых труб в одной ленте, шт.	n_{III}	12	18
Площадь ступени, м ²	F_{2CT}	435	1405
Сечение для прохода газов, м ²	f'_{CT}	92,3	46,58
Сечение для прохода пара, м ²	f''_{CT}	0,140	0,1620
Принимаем темп. пара на входе в ступень, °C	t'_{CT}	534	351,27
Принимаем темп. пара на выходе из ступени, °C	t''_{CT}	560	405
Энтальпия пара на входе, кДж/кг	h'_{CT}	3359,81	2600
Энтальпия пара на выходе, кДж/кг	h''_{CT}	3487,54	2985,58
Температура газов перед ступенью, °C	ϑ'_{CT}	1021	859
Температура газов за ступенью, °C	ϑ''_{CT}	871,5	698,26
Эффективная толщина излучающего слоя	S_{CT}	0,401	0,163
Коэффициент поглощения лучей газами	k_G	15,145	26,945
Коэффициент поглощения лучей золой	$k_{ЗЛ}$	77,872	86,923
Критерий Бугера	Bu	0,185	0,126
Степень черноты газов ступени	α_{CT}	0,169	0,119
Тепловосприятие ступени от предыдущей ступени через излучение, кДж/кг	Q^L_{CT}	52,73	-
Теплота, отданная газами пароперегревателю, кДж/кг	Q^B_{CT}	710,70	1685,23
Энтальпия дымовых газов за ступенью, кДж/кг	H''_{CT}	8784,74	6958,66
Температура газов за ступенью, °C	ϑ''_{CT}	871,5	842
Скорость газов, м/сек	ω_G	5,69	9,90
Коэффициент теплопередачи конвекцией, ккал/(ч×м ² ×K)	α_K	68,820	75,142
Средний удельный объём пара, м ³ /кг	v_{II}	0,0242	0,0136
Скорость пара, м/сек	ω_{II}	17,43	11,34

Продолжение таблицы 4.13 - Результат теплового расчёта 1 и 4 ступеней пароперегревателя

Наименование	Обозн.	Значение	
		4 ст.	1 ст.
Коэффициент теплопередачи от стенки пару, ккал/(ч×м ² ×К)	α_2	3789,24	2410,41
Температура загрязнённой стенки, °С	t_3	752,77	529,55
Коэффициент теплопередачи излучением, ккал/(ч×м ² ×К)	$\alpha_{л}$	49,36	19,186
Коэффициент теплопередачи от газов, ккал/(ч×м ² ×К)	α_1	118,181	94,328
Коэффициент теплопередачи ступени, Вт/(ч×м ² ×К)	k	89,11	58,902
Температурный напор для ступени, °С	Δt	402,22	400,495
Количество тепла за счёт теплопередачи, кДж/кг	$Q^T_{СТ}$	706,13	1661,41
Лучевоспринимающая поверхность потолка, м ²	$F_{ЛПОТ}$	-	72
Суммарная поверхность стен поворотной камеры, м ²	$F_{1СТ}$	-	357
Поверхность подвесных труб в поворотной камере, м ²	$F_{ПК}$	-	151

Таблица 4.14. - Результат расчёта водяного экономайзера и воздухоподогревателя

Наименование	Обозн.	Значение			
		ВЭК ст. 2	ВЗП 2 ст.	ВЭК ст. 1	ВЗП 1 ст.
Наружный диаметр труб, м	d_H	0,032	0,04	0,032	0,04
Внутренний диаметр труб, м	d_{BH}	0,022	0,037	0,024	0,037
Поперечный шаг, м	S_1	0,08	54	0,08	60
Продольный шаг труб, м	S_2	0,055	42	0,046	42
Площадь поверхности, m^2	F_{2CT}	2884	11830	4300	24700
Сечение для прохода газов, m^2	f'_{CT}	44,7	21,50	39,4	21,10
Сечение для прохода нагреваемой среды, m^2	f''_{CT}	0,127	26,4	-	25,8
Температура нагреваемой среды на входе в ступень, °C	t'_{CT}	263,3	230	230	60
Температура нагреваемой среды на выходе из ступени, °C	t''_{CT}	338	366	258	230
Энтальпия нагреваемой среды на входе, кДж/кг	h'_{CT}	1124	1297	994	332
Энтальпия нагреваемой среды на выходе, кДж/кг	h''_{CT}	1586	2096	1124	1297
Температура газов перед ступенью, °C	ϑ'_{CT}	683,31	421	333	255
Температура газов за ступенью, °C	ϑ''_{CT}	421	333	255	147
Энтальпия дымовых газов перед ступенью, кДж/кг	H'_{CT}	6830,73	4099,31	3257,12	2490,06
Энтальпия дымовых газов за ступенью, кДж/кг	H''_{CT}	4099,27	3257,08	2490,06	1433,76
Скорость газов, м/сек	ω_G	8,23	-	6,64	-
Скорость воздуха, м/сек	ω_P	-	6,70	-	5,02
Коэффициент теплопередачи конвекцией, ккал/($ч \times m^2 \times K$)	α_K	77,6	24,3	79,3	21,7
Коэффициент теплопередачи ступени, Вт/($ч \times m^2 \times K$)	k	77,6	19,4	79,3	17,3
Температурный напор для ступени, °C	Δt	241,38	76,47	45,59	49,77
Количество тепла за счёт теплопередачи, кДж/кг	Q^T_{CT}	2708	881	779	1069

5 Гидравлический расчёт контура циркуляции

5.1 Расчёт контура циркуляции

Гидравлический расчёт контура циркуляции с использованием барабана и радиально-осевого циклона выполняется для проверки работоспособности контура, его устойчивости к застою и опрокидыванию циркуляции, а также для сравнения показателей в случае использования барабана.

Наиболее важным для работы контуров циркуляции является гидравлическое сопротивление радиально-осевых циклонов.

Чем выше сопротивление сепараторов, тем труднее добиться нормальной работы контуров. Высокое сопротивление преимущественно создают циклоны.

Режим горения топлива оказывает значительное влияние на надёжность циркуляции. При стабильном горении циркуляция более надёжна. Стабильность горения пылевидного топлива зависит от его природы. В камерных топках стабильность горения зависит от выхода летучих топлива, степени экранирования топки, теплового напряжения топочного объёма, степени зашлакованности труб, состояния зажигательных поясов и ряда других причин. Особенно неблагоприятные условия для надёжного охлаждения стенок кипятельных труб создаются при одновременном воздействии двух факторов - пульсирующем, неустойчивом горении и высоком сопротивлении сепарационных устройств.

Жидкое топливо тоже, хотя и в меньшей степени, способно гореть в пульсирующем режиме. При сжигании мазута повышаются удельные тепловые нагрузки, что изменяет условия циркуляции.

Кроме пульсации горения большое значение имеет величина местных максимальных тепловых нагрузок участков кипятельных труб. Замечено, что котлы, длительное время надёжно работающие на твёрдом топливе, при переводе на мазут либо газ становились эксплуатационно ненадёжными в результате появления многочисленных аварий из-за пережога труб. Для ликвидации аварии потребовалось значительно улучшить водно-химический режим, обеспечивающий работу котлов практически без накипи.

Гидравлический расчёт аналогично тепловому расчёту выполнен с помощью системы компьютерной алгебры – Mathcad и программы для работы с электронными таблицами – Excel входящей в программный пакет Microsoft Office.

Замкнутая гидравлическая система подъёмных и опускных труб в котельных агрегатах с многократной циркуляцией называется циркуляционным контуром. В контур циркуляции входит топочный экран, радиально-осевой циклон и уравнивательная ёмкость.

Расчёт циркуляции выполнен для боковых экранов Л-1 и Л-3 (Б-6; Б-10), и для фронтальных Т-2 и Ф-6 Рисунок 5.1. Расчет выполнен при изменении скорости циркуляции на три значения посредством выполнения последовательных вычислений и заполнения таблиц 5.1 и 5.2.

Таблица 5.1 - Проверка застоя и опрокидывания циркуляции для экранов Л-1 и Л-3

Наименование величины	Барабан	Циклон
Кратность циркуляции	6	6
Среднее тепловое напряжение экранов топки (из теплового расчёта котла), кВт/м ²	108,92	108,92
Приведённая скорость пара в обогреваемой части труб экрана, м/сек	0,756	0,756
Напорное паросодержание застоя в участке после обогрева разверенной трубы	0,79	0,79
Напор застоя в разверенной трубе, Па	80077,3	80077,3
Удельный коэффициент сопротивления экрана	0,418	0,418
Удельный напор опрокидывания циркуляции, Па	1500	1500
Истинная скорость потока в опускных трубах, м/сек	1,156	1,107
Истинный напор циркуляции, Па	15530,72	14257
Отношение напора застоя в разверенной трубе к истинному напору (> 1,2)	5,156	5,617
Напор опрокидывания в экране, Па	32475	32475
Отношение напора опрокидывания в экране к истинному напору (> 1,2)	2,091	2,278
Суммарная паровая нагрузка на сепарационные устройства, кг/сек	111,1	111,1
Масса запасённой питательной воды, кг/сек	6936,57	9214
Объём запасённой питательной воды, м ³	11,7	15,55
Время работы котла на запасе питательной воды, мин	1	1,4

Таблица 5.2 - Проверка застоя и опрокидывания циркуляции Т-2 и Ф-6

Наименование величины	Барабан	Циклон
Кратность циркуляции	6	6
Среднее тепловое напряжение экранов топки (из теплового расчёта котла), кВт/м ²	108,92	108,92
Приведённая скорость пара в обогреваемой части труб экрана, м/сек	1.16	1.16
Напорное паросодержание застоя в участке после обогрева разверенной трубы	0.99	0.99
Напор застоя в разверенной трубе, Па	140406	140406
Удельный коэффициент сопротивления экрана	2.0	2.0
Удельный напор опрокидывания циркуляции, Па	1800	2700
Истинная скорость потока в опускных трубах, м/сек	1.384	1.332
Истинный напор циркуляции, Па	13625	12636
Отношение напора застоя в разверенной трубе к истинному напору (> 1,2)	10.3	11
Напор опрокидывания в экране, Па	61443	92164.5
Отношение напора опрокидывания в экране к истинному напору (> 1,2)	4.5	7.29

Проводя анализ гидравлических расчётов контура циркуляции с использованием барабана и радиально-осевого циклона при остальных равных условиях, можно наблюдать, что полезный напор контура ($S_{пол}$) с использованием циклона несколько меньше чем при использовании барабана.

По условиям проверки надёжности циркуляции в контуре отношение напора застоя и напора опрокидывания циркуляции к полезному напору не должно быть менее 1,2. Это условие соблюдается:

- отношение напора застоя к полезному напору составило 5,156;
- отношение напора опрокидывания к полезному напору составило 2,091.

Применение радиально-центробежного циклона несколько снизило полезный напор, однако, это на устойчивость работы контура в сравнении с барабанным методом сепарации пара практически не оказало никакого влияния, пункты 10; 12 таблица 4.1.

Проверка на застой и опрокидывание циркуляции.

Выражение для проверки недопущения застоя:

$$\frac{S_3}{S_{пол}} > 1,2;$$

Выражение для проверки недопущения опрокидывания:

$$\frac{S_{\text{ОПР}}}{S_{\text{ПОЛ}}} > 1,2$$

где: S_3 - давление при застое циркуляции, Па;

$S_{\text{ОПР}}$ - давление при опрокидывании циркуляции, определенное при минимальной скорости пароводяной смеси в слабо обогреваемой трубе, Па;

$S_{\text{ПОЛ}}$ - полезное давление, расходуемое на преодоление сопротивлений опускной части контура, Па.

Радиально-осевые циклоны относятся к группе сепараторов, питаемые энергией циркуляционных контуров, таким образом, что циркуляционный контур срабатывает некоторую часть движущего напора на преодоление сопротивления сепараторов. Циркуляционные контуры развивают довольно значительную энергию. Работа циркуляционного контура обращается в тепло, расходуемое в котле на подогрев воды, парообразование либо на перегрев пара.

Несмотря на то, что потери энергии как таковой, не происходит, высокое сопротивление сепарационных устройств не желательно, поскольку это ухудшает условия циркуляции в контурах.

Повышенное сопротивление циклонных сепараторов обуславливает неравномерное уменьшение подъёмной скорости пароводяной смеси в кипяtilьных трубах.

Следовательно, для данной группы сепараторов (радиально-осевых циклонов) можно сформулировать следящее правило: сопротивление сепарационных устройств, питаемых энергией циркуляционных контуров, должно быть согласовано с движущими напорами этих контуров. Желательно применение сепараторов обладающих минимальным гидравлическим сопротивлением. Геометрические размеры радиально-осевого циклона полученные в процессе расчёта показаны в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Геометрические размеры циклона

Параметр	Значение
Высота циклона, мм	5500
Внутренний диаметр циклона, мм	600
Толщина стенки циклона, мм	50
Марка стали	12МХ
Высота установки сопла, мм	4000
Сечение сопла, м ²	0,006
Количество входных патрубков	7
Высота установки питательного патрубка, мм	230
Высота установки уравнивающего патрубка, мм	5000

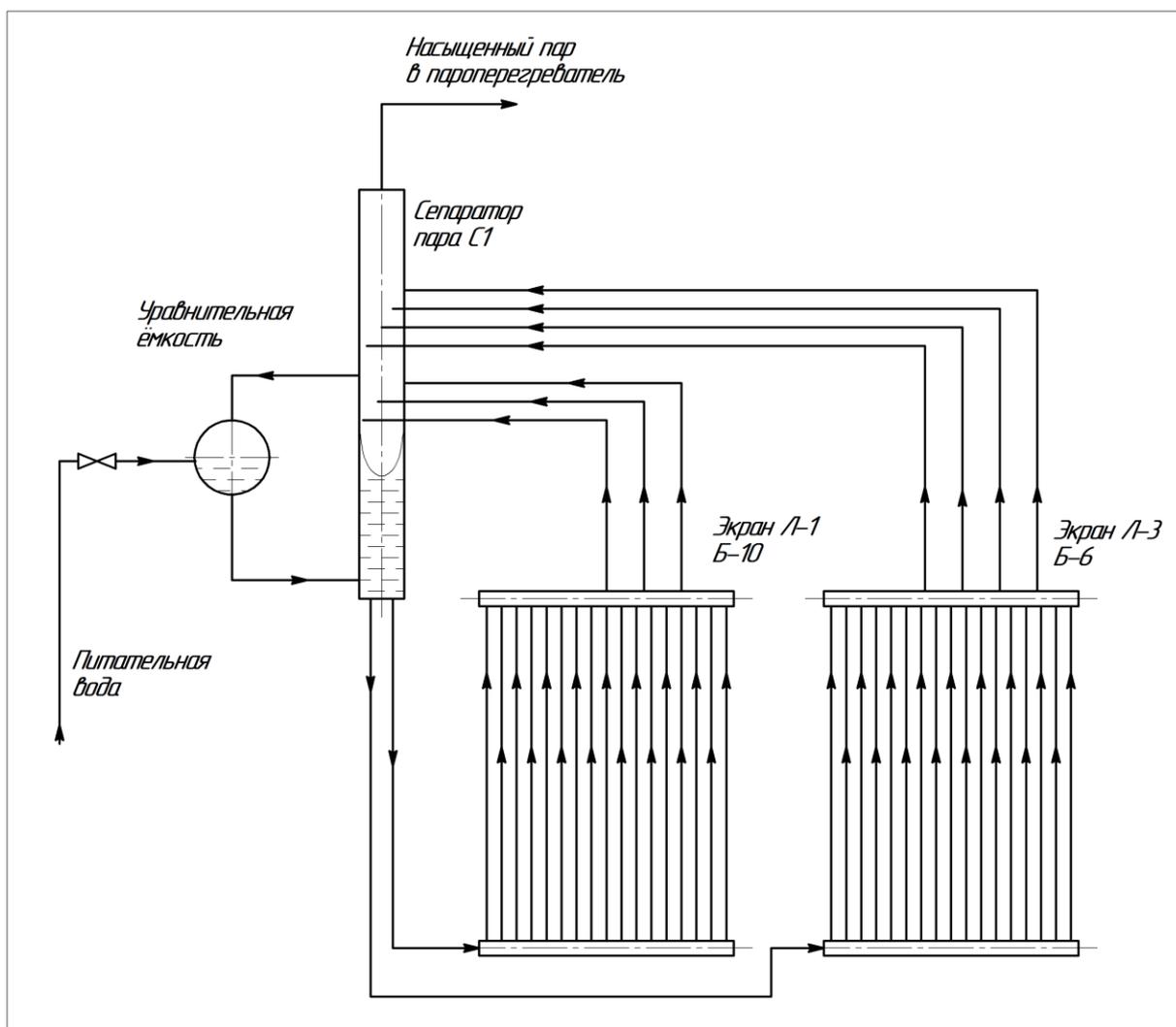


Рисунок 5.1. Гидравлическая схема контуров циркуляции радиально-осевого циклона С1.

5.2 Описание гидравлической схемы котла

Гидравлическая система котельного агрегата состоит из соединённых между собой труб, коллекторов, радиально-осевых циклонов, уравнивающей ёмкости и целого ряда дополнительных устройств и предназначена для подогрева и испарения воды, перегрева пара и регулирования его температуры. Дополнительными устройствами, входящими в гидравлическую систему, могут являться дроссельные и измерительные шайбы, защитные рубашки, арматура, некоторые типы паровых сепараторов, теплообменные аппараты, впрыскивающие устройства.

Гидравлическая схема контуров циркуляции показана в графической части диссертации и состоит из одиннадцати радиально-осевых циклонов С1-С11, двадцати экранных поверхностей топки и уравнивающей ёмкости.

Радиально-осевые циклоны установлены на такой высоте, чтобы минимальный уровень воды в циклоне соответствовал высоте, на котором находился уровень воды в барабане, до проведения модернизации. Таким образом, напор воды в опускных трубах в случае применения циклонных сепараторов будет большим или равным напору создаваемым при использовании барабана.

Питательная вода от экономайзера второй ступени, по двум трубопроводам поступает в уравнительную ёмкость, поддерживая в ней уровень $2/3$ высоты ёмкости. Далее, питательная вода из уравнительной ёмкости по подпитывающим трубопроводам поступает в одиннадцать радиально-осевых циклонов до значения высоты уровня воды находящейся в уравнительной ёмкости. Под действием гидростатического давления вода по опускным трубам из циклонов поступает в нижние камеры топочных экранов. А из камер по экраным трубам поднимается вверх, по пути нагреваясь и частично испаряясь, при этом образуя пароводяную смесь. Средняя плотность пароводяной смеси меньше чем плотность воды, что приводит к появлению сил вызывающих естественную циркуляцию воды в контуре. Полученная таким образом пароводяная смесь поступают в верхнюю камеру топочного экрана, а из неё по пароотводящим трубам через сопло обратно в циклон, таким образом, образуя контур циркуляции. Каждый циклон обеспечивает работу двух контуров циркуляции, кроме двух циклонов работающих в паре с топочными экранами Л-2 и П-2. Включение топочных экранов и циклонов выполнено таким образом, чтобы обеспечить пропорциональное изменение паровой нагрузки между циклонами.

Через пароотводящие трубы пароводяная смесь поступает в конфузор являющийся переходным звеном между круглым сечением трубы и прямоугольным сечением сопла. Сопла расположены в один ряд по окружности циклона, на высоте 4 метра (относительно дна циклона) под углом 70 градусов от вертикальной оси циклона. Таким образом, пароводяная смесь, попадая в сопло, ускоряется согласно уравнениям неразрывности потока и движется вниз по сложной, спиральной траектории, вдоль внутренней поверхности стенок циклона, под действием сил гравитации и приобретённого ускорения. Так как сопла расположены под углом, потоки жидкости при движении практически не взаимодействуют между собой, при таком движении отсутствует влияние одного потока на другой и вода образует сплошную плёнку жидкости на внутренней поверхности стенки циклона.

При движении потока жидкости по спиральной траектории в ней возникает, с одной стороны центробежная сила, которая прижимает поток к стенкам циклона, с другой стороны сила инерции массы, которая, суммируясь силой гравитации, ускоряет поток воды, вдоль вертикальной оси циклона заставляя его двигаться вниз с ускорением. Вода движется вниз до момента соединения с уровнем воды находящейся на дне циклона. Вследствие чего объём жидкости приходит во вращательное движение, образуя на дне циклона крутящуюся воронку. Пар, отделённый от воды под действием перепада давлений и центробежных сил увлекается в верхнюю часть циклона, где он проходит жалюзийный сепаратор и по паропроводу поступает в пароперегреватель.

По мере отбора насыщенного пара из циклона, производится компенсация недостатка воды в контуре циркуляции путём подпитки питательной водой из уравнивательной ёмкости.

При этом за счёт процессов испарения воды и постоянной подпитки будет происходить рост концентрации солей содержащихся в котловой воде. Для предотвращения роста концентрации солей каждый циклон снабжается системой непрерывной продувки, путём отведения части котловой воды содержащейся в циклоне.

В случае возникновения аварийного прекращения подачи питательной воды в котёл, объёма воды запасённого в уравнивательной ёмкости достаточно работы котла в течение 1,4 мин., что превышает время работы котла в сложившейся ситуации при использовании барабана в 1,5 раза.

Часть радиально-осевых циклонов располагаются с левой и правой стороны котла БКЗ-420-140ПТ1 по два с каждой, на отметке 36 м. Эти циклоны работают совместно с топочными экранами Л-1; Л-2; Л-3; П-1; П-2; П-3, образующие левую и правую стенки топки. Остальная часть циклонов располагается с фронтальной стороны котла в количестве 7 штук, эта часть циклонов работает совместно с тыловыми и фронтными топочными экранами. Гидравлическая схема включения топочных экранов, выполнена таким образом, чтобы обеспечить, равномерное распределение паровой нагрузки между циклонами. Расположение циклонов на котле показано на рисунках 5.2 и 5.3.

Для выравнивания давления в циклонах и возможности передачи насыщенного пара паросборные камеры потолочного пароперегревателя все пароотводящие патрубки циклонов объединяются в одну паросборную камеру, из которой пар поступает в пароперегреватель, рисунок 5.4. Кроме того,

паросборная камера снабжается импульсным предохранительным клапаном, срабатывающим при повышении давления в камере до значения 171 кгс/см^2 .

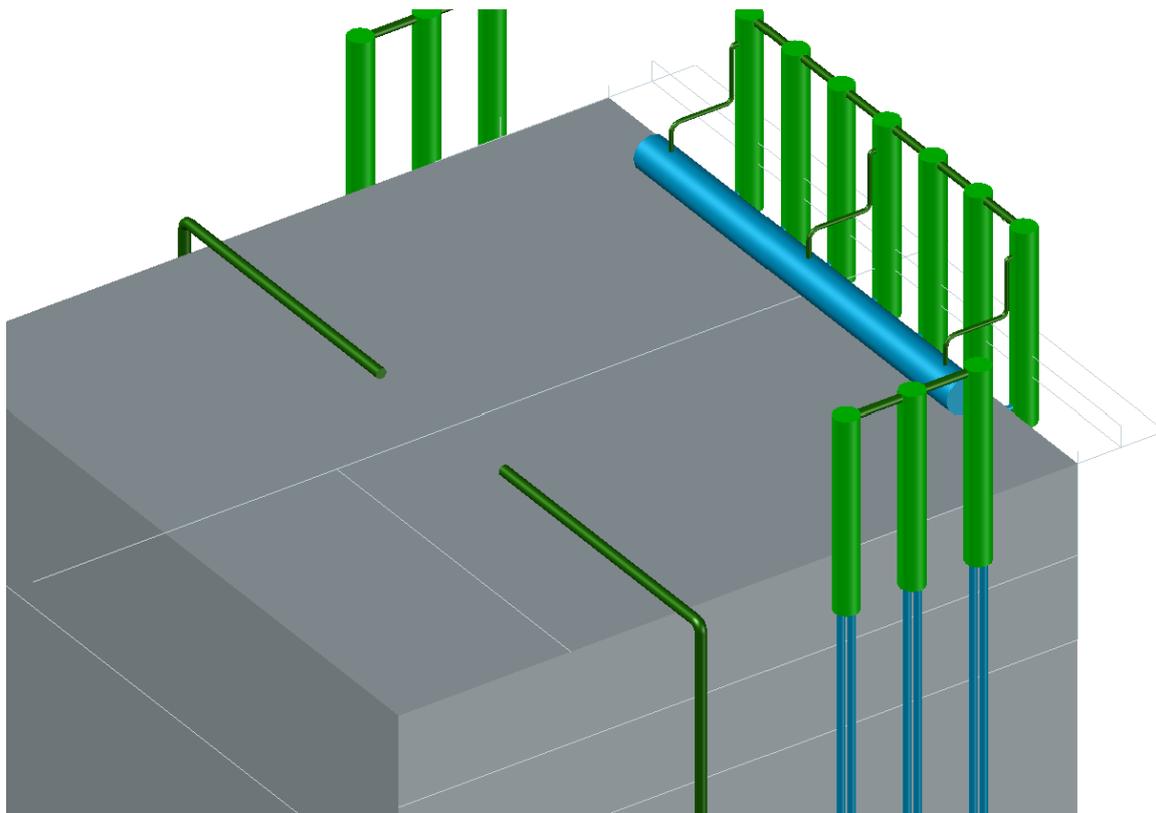


Рисунок 5.2 Вид сверху на котёл БКЗ-420-140ПТ1 оснащённый радиально-осевыми циклонами.

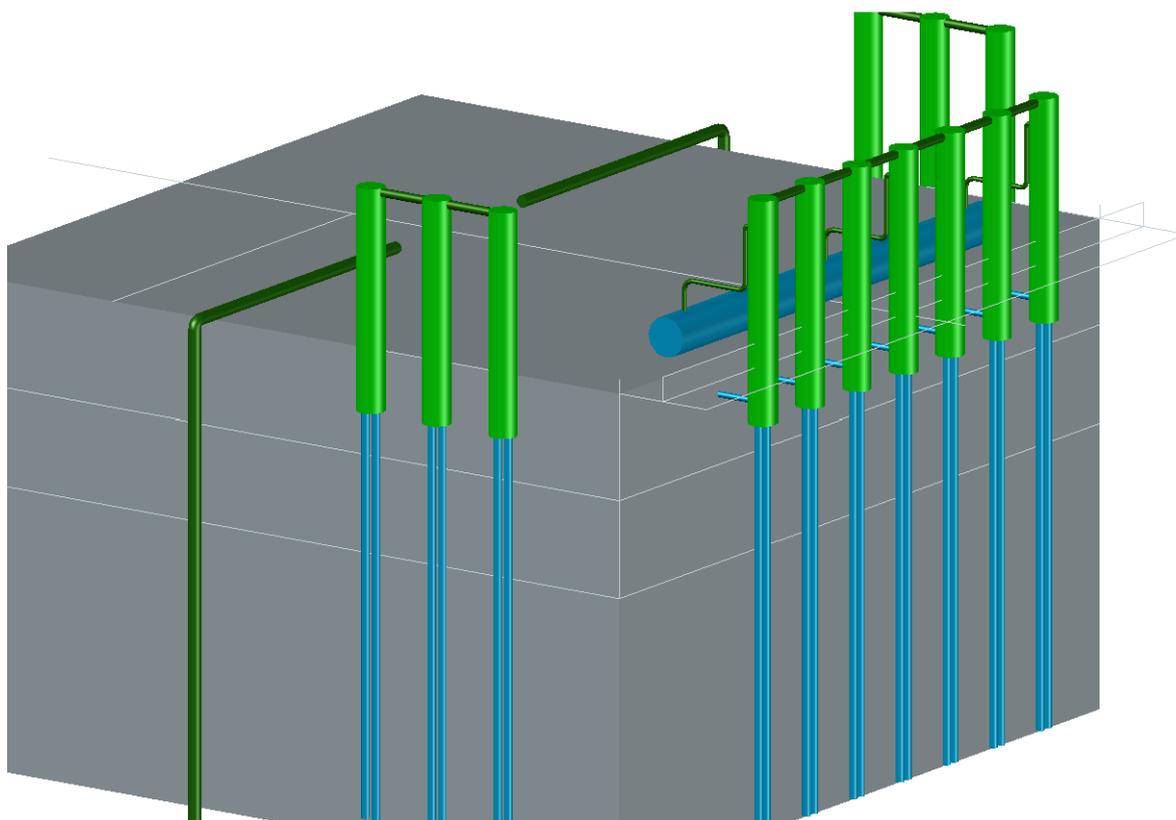


Рисунок 5.3 Вид на котёл БКЗ-420-140ПТ1 оснащённый радиально-осевыми циклонами.

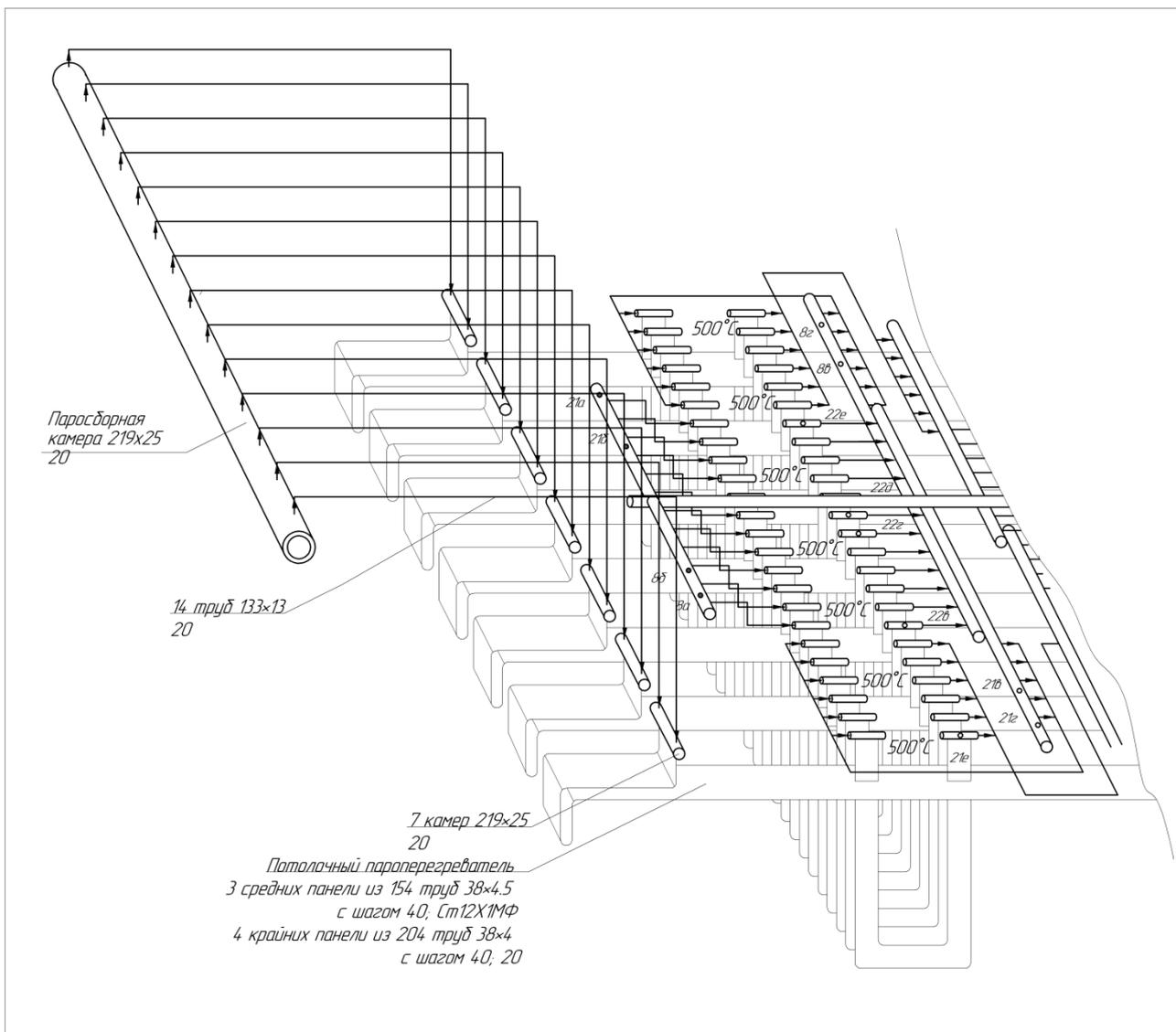


Рисунок 5.4 Схема подключения радиально-осевых циклонов к потолочному пароперегревателю (часть схемы пароперегревателя условно не показана).

5.3 Система автоматического регулирования питания котла

Автоматическая система регулирования питания предназначена для поддержания материального соответствия между расходами питательной воды в котёл и нагрузке котла по пару. Показателем этого соответствия служит средний уровень воды в циклонах или в уравнивательной ёмкости.

На современных барабанных котлах нашли широкое применение автоматические системы регулирования с трёх импульсными регуляторами. Это объясняется чрезвычайно жёсткими требованиями, предъявляемыми к качеству регулирования уровня.

Снижение уровня в уравнивательной ёмкости ниже допустимых пределов (упуск уровня воды) может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах или опрокидыванию циркуляции и как следствие к пережогу экранных

труб. При значительном повышении уровня воды в одном из циклонов возможен захват частиц воды паром и вынос их в пароперегреватель и турбину, что вызовет занос пароперегревателя и турбины солями и может привести к их разрушению.

Предельные значения уровня воды в циклонах котла определяются по максимальному и минимальному значению уровня воды, в уравнильной ёмкости позволяющие вести безаварийную эксплуатацию котла. Верхняя уставка составляет 950 мм, а нижняя - 450 мм. Верхняя уставка технологических защит предотвращает заброс котловой воды в верхнюю часть циклона, а далее в пароперегреватель, нижняя уставка защиты предотвращает пережог кипяtilьных труб точных экранов.

Таким образом, зона работы системы регулирования питания ограничена уставкой защиты от понижения уровня в циклонах котла, с одной стороны, и уставкой открытия аварийного слива с другой. Эти пределы определяют безопасность работы котла, выход параметра за их значения вызывает аварийную ситуацию.

Автоматическая система регулирования питания котла должна обеспечить удержание уровня в допустимых пределах:

- при стационарном режиме (при отсутствии резких возмущений по нагрузке) максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 20 мм;
- при скачкообразном возмущении по нагрузке на 10% (исходная нагрузка - номинальная) максимально допустимые отклонения по уровню не должны превышать ± 50 мм.
- при нормальном стационарном режиме работы котла число включений регулятора не должно превышать шести включений в минуту.

Типовая система регулирования питания котла содержит следующие элементы:

- первичные измерительные преобразователи (датчики уровня);
 - регулирующее устройство (контроллер);
 - пускорегулирующую аппаратуру;
 - исполнительный механизм;
 - регулирующий клапан.
- В качестве уровнемера используется получившее наибольшее распространение гидростатические приборы с уравнильными сосудами. Для преобразования перепада давления в унифицированный токовый сигнал 4-20

мА применяется первичный преобразователь перепада давлений (дифференциальный манометр-уровнемер) Схема измерения уровня в уравнительной ёмкости показана на рисунке 5.2. Для большей точности и надёжности для измерения уровня в уравнительной трубе используются два комплекта измерения.

- Первичным измерительным преобразователем расхода воды служит сужающее устройство, установленное на трубопроводе подачи питательной воды в котёл, работающее в комплекте с дифференциальным манометром - расходомером преобразующим перепад давления в унифицированный токовый сигнал 4-20 мА.

- Первичными измерительными преобразователями расхода пара, аналогично, как и расхода воды, служит сужающее устройство, установленное на выходных паропроводах острого пара из котла слева и справа, работающие в комплекте с дифференциальными манометрами - расходомерами преобразующие перепад давления в унифицированный токовый сигнал 4-20 мА.

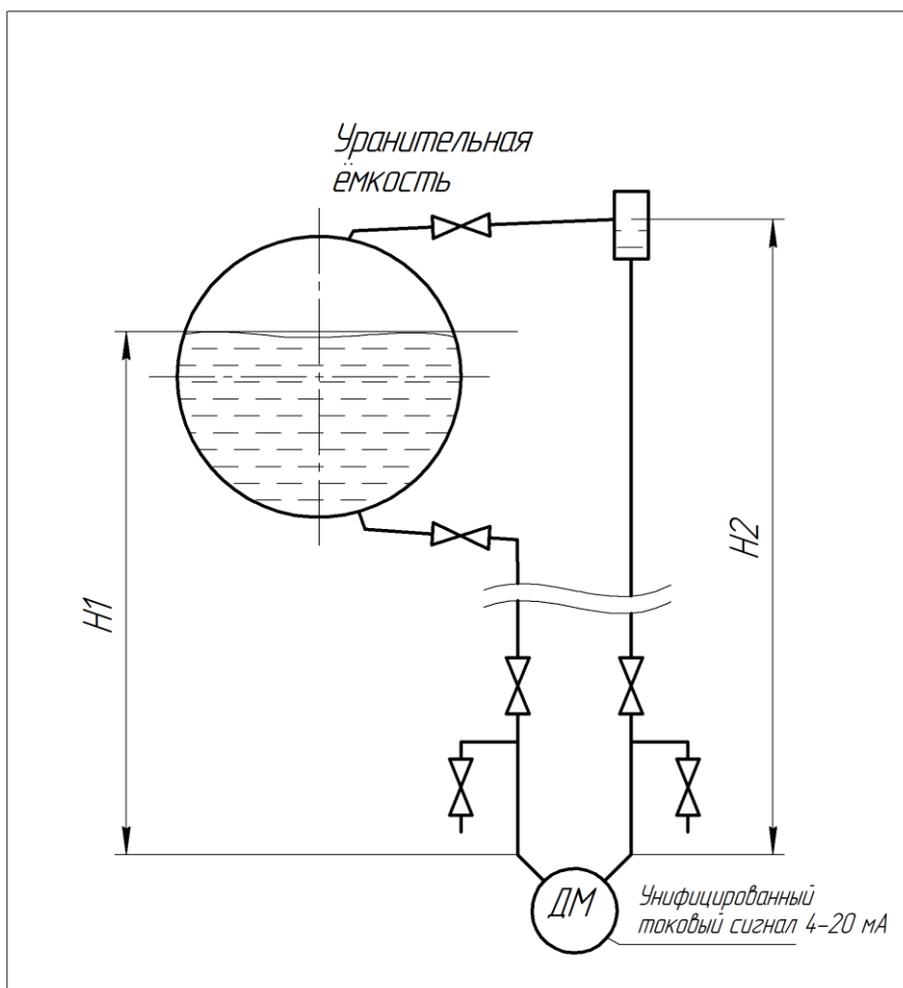


Рисунок 5.2 Схема измерения уровня в уравнительной ёмкости котла.

Структурная схема системы автоматического регулирования уровня воды в уравнительной ёмкости показана на рисунке 5.3. Система регулирования в своей работе учитывает три возмущения по уровню в барабане, расходу пара за котлом и расходу питательной воды на котёл.

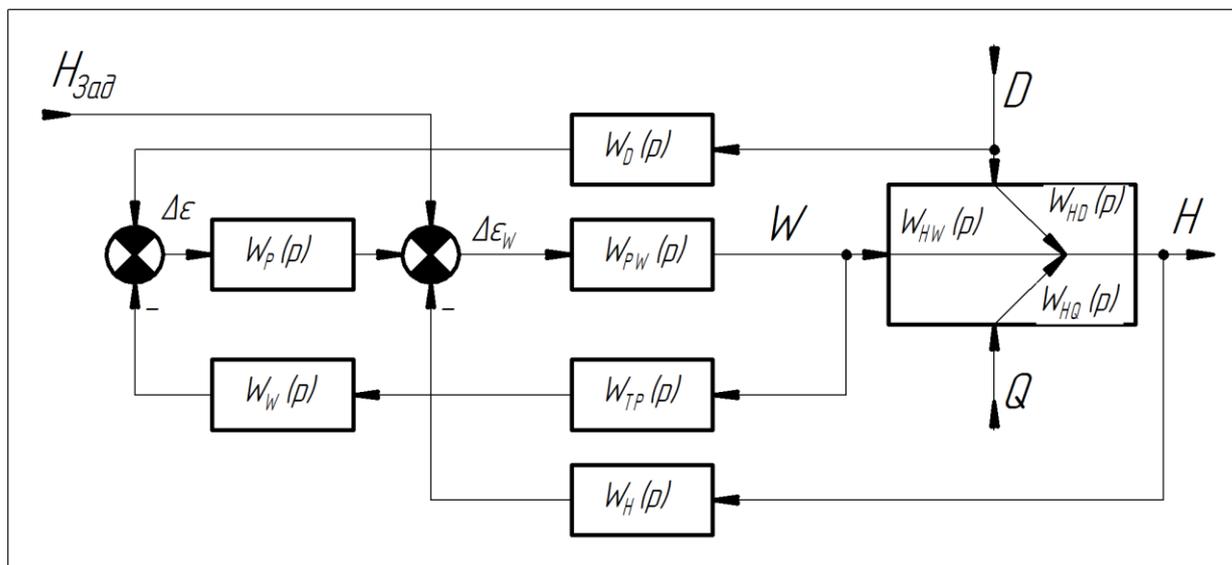


Рисунок 5.3. Структурная схема системы автоматического регулирования уровня воды в уравнительной ёмкости.

где

H_3 – сигнал задания системе автоматического регулирования, мм;

D – расход пара за котлом, т/ч;

Q – тепловыделение в топке КДж;

H – уровень воды в уравнительной ёмкости, мм;

$\Delta \epsilon$ – сигнал рассогласования (входной сигнал регулятора);

$W_{HD}(p)$ – передаточная функция объекта управления по расходу пара;

$W_{HW}(p)$ – передаточная функция объекта управления по расходу воды;

$W_{HQ}(p)$ – передаточная функция объекта управления по тепловыделению в топке;

$W_D(p)$ – передаточная функция измерительного преобразователя расхода пара;

$W_p(p)$; $W_{pw}(p)$ – передаточные функции регуляторов;

$W_w(p)$ – передаточная функция измерительного преобразователя расхода воды;

$W_{TP}(p)$ – передаточная функция участка трубопровода питательной воды;

$W_H(p)$ – передаточная функция измерительного преобразователя уровня воды;

Регулятор питания котла работает следующим образом: Унифицированные токовые сигналы 4-20 мА от первичных преобразователей поступают в микропроцессорный контроллер, где проходят этап первичной обработки и преобразуются с помощью аналогово-цифрового преобразователя в цифровой код. Последующая математическая обработка этих сигналов выполняется согласно заложенных в контроллер алгоритмов (программы).

Цифровые сигналы от датчиков-уровнемеров подвергаются математической обработке, и на основании измеренного перепада вычисляется значение уровня в уравнительной ёмкости каждого датчика, далее определяется среднее значение уровня в ёмкости.

Сигналы по расходу пара и по расходу воды суммируются между собой с разными знаками, таким образом, получается разница между расходами пара и водой $\Delta\varepsilon$ или сигнал по массовому дисбалансу. Далее, сигнал дисбаланса поступает на вход интегрального регулятора, функция которого накопление ошибки с течением времени. Выходной сигнал интегрального регулятора пропорциональный времени и сигналу рассогласования суммируется с сигналом по уровню воды в уравнительной трубе и с сигналом задания (сигнал задания со знаком плюс, а сигналы по уровню и дисбаланса со знаком минус), при этом получается сигнал рассогласования между заданным значением уровня и текущим $\Delta\varepsilon_w$. Этот сигнал рассогласования поступает на вход пропорционально-интегрального регулятора, который формирует регулирующее воздействие на исполнительный механизм, тот в свою очередь, преобразует импульсы управления регулятора в непосредственное перемещение штока регулирующего клапана. Таким образом, регулятор, изменяя расход воды подаваемой в уравнительную трубу, изменяет в ней уровень и ликвидирует разницу между массовым дисбалансом пара и воды, уровнем и заданием.

Передаточная функция интегрального регулятора:

$$W_{(p)} = \frac{1}{T_i p}$$

Передаточная функция пропорционально-интегрального регулятора:

$$W_{(p)} = \frac{K}{T_i p + 1}$$

где T_i – время интегрирования, сек. (время изодрома);

p – оператор Лапласа;

K – коэффициент пропорциональности.

Выполняя обратное преобразование Лапласа можно получить функциональную зависимость между рассогласованием и управляющим воздействием:

- для интегрального регулятора:

$$y(t) = \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \Delta \varepsilon d(t)$$

- для пропорционально-интегрального регулятора:

$$\mu(t) = K\Delta\varepsilon + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \Delta \varepsilon d(t)$$

Передаточные функции объекта управления могут быть определены расчётным путём или экспериментально, для этого могут использоваться различные методы. После чего определяются параметры настройки регулятора. И с помощью математического моделирования проводится анализ автоматической системы регулирования на устойчивость, результатом которого является определение запаса устойчивости при нанесении возмущений по координатам задания, расхода пара, расхода воды, уровню в уравнивательной трубе.

5.4 Технологические защиты котла

Для предотвращения аварийных ситуаций по забрасыванию воды в пароперегреватель (перепитке котла водой) предусматривается наличие двухступенчатой технологической защиты по повышению уровня в уравнивательной ёмкости. Первая ступень защиты воздействует на открытие задвижек аварийного слива из уравнивательной ёмкости (аварийный сброс). Вторая ступень защиты воздействует на останов котла. Операции отключения котла и открытия арматуры аварийного слива при достижении значений уставок срабатывания выполняются соответствующими устройствами защиты (при отключении) и блокировки (открытие-закрытие аварийного слива).

Сигнал на срабатывание технологических защит воздействующих на останов котла и на открытие аварийного слива формирует микропроцессорный контроллер согласно заложенных в его память алгоритмов и уставок.

В качестве дополнительной меры безопасности в диссертации предлагается оснащение каждого радиально-осевого циклона сигнализаторами максимального и минимального уровня. Для этих целей, могут найти применение сигнализаторы уровня ЭЛЕМЕР-СВУ-21, производства отечественного научно производственного предприятия «ЭЛЕМЕР»

занимающееся разработкой и производством средств и систем автоматизации технологических процессов, метрологического оборудования и эталонных средств измерения.

Основные характеристики ЭЛЕМЕР-СВУ-21:

- Длина погружной части зонда в зависимости от модификации чувствительного элемента, L:
 - 120...4000 мм (стержневой М1);
 - 80...4000 мм (кольцевой М2);
 - 150...4000 мм (вилочковый М3);
- Предельное давление контролируемой среды — 6,3; 16; 25; 40 МПа;
- Напряжение питания — =24В;
- Выходные сигналы:
 - унифицированный сигнал 4...20 мА (в дискретном режиме);
 - контакты реле;
- Диапазон температуры контролируемой среды — -196...+400 °С;
- Степень защиты от пыли и влаги — IP65/IP67;
- Диапазон температуры окружающей среды — -65...+80 °С.

6 Принцип действия и конструкция циклона

В этой главе описаны конструкция и принцип действия, радиально-осевых циклонов применяемых в составе парового котла БКЗ-420-140ПТ1, а также физические процессы, протекающие в них. Разработана конструкция циклона по предварительно выполненному гидравлическому расчёту циклона.

Радиально-осевые циклоны получили наибольшее распространение в современной энергетике как при расположении их внутри, так и вне барабана. Широкому их распространению способствовала высокая эффективность работы и приемлемые значения гидравлического сопротивления.

В радиально-осевых циклонах пароводяная смесь вводится по касательной к образующей - так же как и в радиальных циклонах, а пар отбирается как в осевых в верхней части циклона.

6.1 Принцип действия радиально-осевого циклона

Процессы, протекающие в паровом объёме циклона: В паровом объёме происходит разрушение пены и сепарация капелек воды. Поля скоростей, а, следовательно, и процессы в паровом объёме циклона в большей степени зависят от расположения пароотводящих штуцеров.

В связи с отсутствием организованного перемещения потоков пара от периферии к центру угловую скорость вращения пара можно принять одинаковой по всему сечению, а окружная скорость будет наибольшей у стенок.

В соответствии с этим центробежные ускорения, развиваемые в циклонах, зависят от радиуса вращения. Чем ближе к оси, тем ускорение меньше.

Отсепарированной считается капля, достигшая в своём движении стенки циклона. Поскольку в центральной части радиально-осевого циклона центробежные ускорения незначительны и подъёмная скорость пара должна быть близкой к скорости витания капель в объёме.

Условия для сепарации капель, расположенных близко от стенок циклона, значительно лучше, чем для капель, располагаемых у оси. Из этого следует, что в радиально осевых циклонах подъёмная скорость пара не может быть значительно выше, чем у объёмных сепараторов.

По центру циклона движется пар с капельками воды, на которые в основном влияет лишь сила тяжести. Однако при высоком солесодержании котловой воды нагрузка парового пространства эффективно работающих радиально-осевых циклонов оказывается выше предельно допустимой нагрузки объёмных сепараторов при сравнимых условиях водно-химического режима. Это происходит вследствие того, что в циклоне более интенсивно разрушается устойчивая пена. Кроме того, высота парового объёма в выносных циклонах значительно больше, чем в барабане.

Процессы, протекающие в водяном объёме циклона: В водяном объёме происходит сепарация пузырьков пара. Поле скоростей в водяном объёме радиально-осевого циклона в большей степени зависит от расположения водоотводящих штуцеров, а также от наличия внутрициклонных устройств.

Донный отвод воды. При вращении и одновременном организованном перемещении к центру потока воды между концентрическими слоями водяного объёма имеется перепад давления, под действием которого в водяном объёме циклона образуется устойчивая воронка, имеющая периферийную и центральную области.

Поскольку в каждом элементарном цилиндре радиуса давление по высоте определяется по закону гидростатики.

Внутренняя часть воронки, ограничивается радиусом водоотводящего штуцера, имеет другое строение. Она вращается с одинаковой угловой

скоростью и её поверхность представляет собой параболу, поскольку при постоянной угловой скорости отсутствует организованное движение воды от периферии к центру. Следовательно, общая конфигурация воронки в циклоне будет состоять из двух частей: Внешней - гиперболической и внутренней - параболической.

Суммарная высота кривых при обычно встречающихся значениях входной скорости, соотношения радиусов и других величин может превышать высоту водяного объёма циклона. В этом случае вершина воронки может втягиваться в опускную трубу, захватывая пузырьки пара.

Моделирование процесса отбора воды из циклона через одно и два донных отверстия, смещённых с оси циклона на $1/2$ радиуса, показало, что при одном отверстии по оси циклона в водяном объёме образуется симметричная воронка, при одном смещённом с оси донном отверстии образуется менее развитая воронка, ось которой свёрнута в спираль, а при двух незащищённых донных отверстиях наблюдается устойчивая и хорошо развитая воронка.

Слой воды у стенок циклона образует сравнительно тонкое кольцо.

Из опытов с незащищённым донным отверстием видно, что окружная скорость воды увеличивается при перемещении потоков от периферии к центру.

Если перенести результаты наблюдений с холодной воды на горячую воду и пар, то следует, что высота воронки зависит от параметров пара. С повышением давления интенсивность образования воронок увеличивается.

Для предотвращения образования воронок применяются в основном крестовины или планки в водяном объёме и конусы с крестовинами в паровом пространстве.

Донный отвод с крестовиной. Для защиты опускных труб выносных циклонов от образования воронок применяют крестовины.

Крестовина разрушает организованное вращение воды и под ней имеет место поле скоростей, характерное для донных отверстий без защиты. Окружная скорость воды увеличивается при переходе от периферии к центру. Воронка при этом не образуется.

Процессы, протекающие на границе раздела воды и пара: На границе раздела воды и пара происходят процессы образования и разрушения пены. При ударе воды об уровень может образовываться пена, разрушением которой является важным условием надёжной работы циклона. Рассмотрим некоторые особенности движения воды от штуцеров ввода пароводяной смеси до уровня воды в циклоне.

Ввод пароводяной смеси в радиально-осевые циклоны осуществляется обычно выше уровня воды. Отделившаяся вода стекает по стенкам циклона сплошной плёнкой.

Чем ниже уровень воды в циклоне и соответственно больше высота падения струй воды, тем круче угол падения.

Угловая скорость воды по стенкам циклона при перемещении её вниз снижается значительно быстрее, чем угловая скорость основной массы вода. Это происходит вследствие того, что масса плёнки значительно меньше массы основного объёма воды.

На уровне воды имеется слой пены, высота которого изменяется в зависимости от высоты падения струй, скорости ввода и концентрации примесей в воде.

Как показали измерения, при моделировании на холодной воде толщина слоя пены возрастает с увеличением энергии удара струи об уровень, а также при увеличении щёлочности циркулирующей воды.

Процессы в циклонах для пароводяной смеси отличаются от наблюдаемых, при моделировании на холодной воде, но хорошо объясняются принятой схемой процесса: на уровне воды в циклоне происходит образование "вторичной" пены.

Интенсивность образования "вторичной" пены зависит от высоты падения струй воды с отметки ввода пароводяной смеси до уровня, а также химического состава воды и, возможно, температуры насыщения.

Наряду с образованием пены происходит её разрушение, причём интенсивность разрушения пропорциональна окружной скорости воды. Высота слоя пены обуславливается тем равновесием, которое устанавливается между этими двумя процессами.

В тех случаях, когда образование пены происходит более интенсивно, чем её разрушение, возможно заполнение пеной всего парового объёма циклона и вынос её.

С увеличением устойчивости пены усложняется не только сепарация пара от воды, но также затрудняется выведение пузырьков пара из толщи котловой воды.

При моделировании на холодной воде процесса разделения воды и пузырьков воздуха, увлекаемых в толщу воды, замечено, что в случае применения боковых отводов мелкие пузырьки воздуха в виде туманного облачка группируются по оси циклона. У боковых стенок вода свободна от взвешенных частиц.

На пузырьки газа во вращающейся жидкости действуют центростремительные и подъёмные силы.

Центростремительная сила обуславливается выталкивающим центрифугирующим действием циклона на пузырьки пара.

У периферии, там, где большие центробежные ускорения, пузырьки движутся к центру почти горизонтально, так как силы центробежного ускорения в большинстве случаев превосходят силу тяжести.

По центру циклона капли воды поднимаются вертикально.

Сепарация пузырьков пара из котловой воды особенно актуальна при высоком давлении. С повышением параметров уменьшается разность плотностей вода и пара, а отсюда следует важный вывод, что применение центробежной сепарации на котлах высокого давления при рациональном выполнении водоотводящих устройств может улучшать процессы циркуляции.

6.2 Конструкция радиально-осевого циклона

Увеличение размеров циклонов связано со значительными затратами средств, поэтому диаметр и высоту циклонов выбирают минимально допустимыми по условиям надёжной работы сепарационных устройств.

К конструкции радиально-осевых циклонов предъявляются следующие требования:

- достаточная эффективность по условиям солесодержания котловой воды.
- удобно расположение элементов жалюзийного сепаратора внутри корпуса циклона.
- малое влияние сопротивления радиально-осевых циклонов на условия циркуляции.
- рациональное использование парового объёма циклона.
- малая громоздкость.
- высокая надёжность эксплуатации.
- приемлемые затраты труда и времени.

Оптимальным окажется следующее размещение штуцеров и сопел:

- Ввод пароводяной смеси осуществляется по касательной через несколько сопел расположенных по окружности корпуса циклона, количество сопел определяется количеством пароводящих труб экранов входящих в этот контур циркуляции.

- Ввод питательной воды осуществляется через питательный штуцер под уровень воды в циклоне.
- Опускные трубы - в нижней части циклона вдоль его геометрической оси.
- Отбор пара осуществляется через штуцер расположенный в верхней части циклона.

Корпус: Из многих вариантов простейший в исполнении цилиндрический корпус как самый простой в изготовлении. Внутри корпуса расположены крестовина и жалюзийный сепаратор. Форма корпуса циклона мало влияет на эффективность его работы, и различные формы циклонов не имеют одна перед другой существенных преимуществ. Поэтому изыскание новых конфигураций, а также проработка известных их разновидностей малоперспективны.

Ввод пароводяной смеси: так же как и корпус, можно выполнить в нескольких вариантах:

- с использованием одного сопла;
- С использованием нескольких сопел;
- Выполнить ввод смеси в корпус циклона под углом 90 или меньшим.

Принимаем вариант: поток пароводяной смеси движется от экранов, по пароотводящим трубам и переходит от круглого сечения к прямоугольному при помощи конуса. Конус расположен относительно вертикальной оси циклона на угол 20° . Таким образом можно получить равномерно распределение воды вдоль стенки циклона.

Отвод воды: Отвод воды осуществляется через две опускные трубы расположенных в нижней части циклона.

Конструкция радиально-осевого циклона разработана по предварительно проведённым гидравлическим расчётам и показана в графической части диссертации, лист 3.

Трёх мерная модель циклона показана на рисунке 6.1.

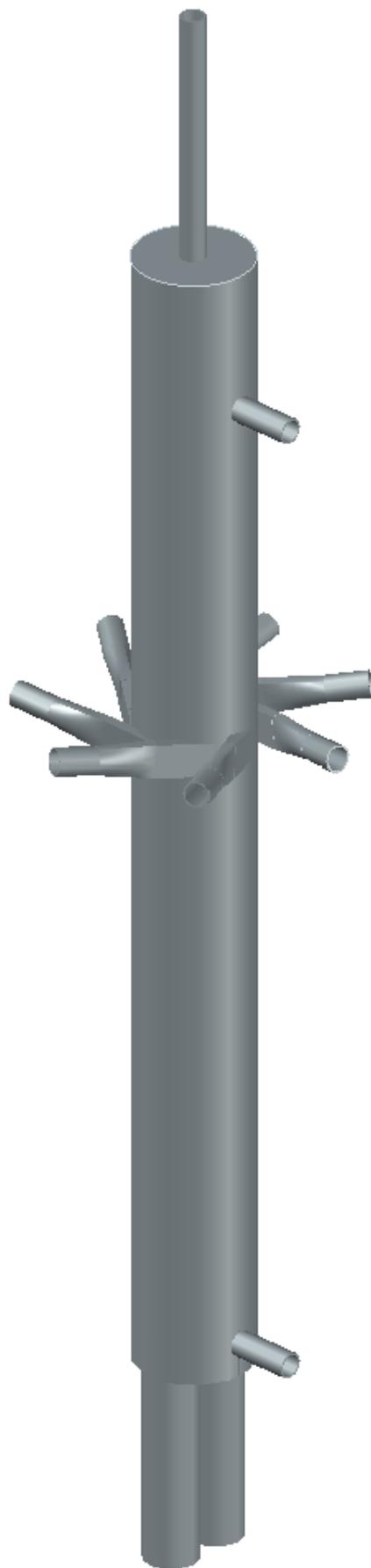


Рисунок 6.1 Трёхмерная модель циклона.

7 Математический эксперимент

В данной главе описаны методы и результаты проведения математического моделирования работы радиально-осевого циклона С1 выполненного с использованием метода конечных элементов на основе трёхмерной модели, которая является образцом или эталоном имитирующим работу реальной установки. Данный циклон работает в составе гидравлического контура циркуляции, который включает в себя два топочных экрана Л-1 и Л-3, рисунок 2.6.

7.1 Описание метода математического моделирования

Сущность методологии математического моделирования состоит в замене исходного объекта его образом - математической моделью и дальнейшем изучении модели, например, с помощью реализуемых на компьютерах вычислительных алгоритмов. Этот метод познания сочетает в себе многие достоинства теории и эксперимента. Работа не с самим объектом (явлением, процессом), а с его моделью дает возможность, относительно быстро и без существенных затрат исследовать его свойства и поведение в любых имитируемых ситуациях. В то же время эксперименты с моделями объектов позволяют при поддержке современной вычислительной техники и численных алгоритмов подробно изучать объекты в достаточной полноте, недоступной чисто теоретическим подходам (преимущество эксперимента). Методология математического моделирования бурно развивается, охватывая все новые сферы от разработки технических систем до анализа сложнейших социальных и экономических процессов.

Моделирование движения жидкости и пара в радиально-осевом циклоне проводится с использованием метода конечных элементов - это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики. Метод широко используется для решения задач гидродинамики и применяется для решения задач топологической оптимизации.

Суть метода заключается в поиске решения дифференциальных уравнений в области, которая разбивается на конечное количество элементов. В каждом из элементов произвольно выбирается вид аппроксимирующей функции. В простейшем случае это полином первой степени. Вне своего элемента аппроксимирующая функция равна нулю. Значения функций на границах элементов (в узлах) являются решением задачи и заранее неизвестны. Коэффициенты аппроксимирующих функций обычно находятся из условия равенства значения соседних функций на границах между элементами (в узлах).

Затем эти коэффициенты выражаются через значения функций в узлах элементов. Составляется система линейных алгебраических уравнений. Количество уравнений равно количеству неизвестных значений в узлах, на которых ищется решение исходной системы, прямо пропорционально количеству элементов и ограничивается только возможностями электронно-вычислительной машины. Так как каждый из элементов связан с ограниченным количеством соседних, система линейных алгебраических уравнений имеет разрежённый вид, что существенно упрощает её решение.

К основным преимуществам вычислительного эксперимента можно отнести:

- возможность исследования объекта изучения без изменения его реальных геометрических параметров радиально-осевого циклона;
- возможность исследования каждого фактора в отдельности, в то время как в реальности они действуют одновременно;
- возможность исследования нереализуемых на практике процессов.

7.2 Этапы математического моделирования

Процесс математического моделирования состоит из пяти основных этапов:

- **Создание трёхмерной геометрической модели.** На этапе создания трёхмерной геометрической модели рабочего объёма радиально-осевого циклона использовался программный комплекс систем автоматизированного проектирования SolidWorks, который используется для автоматизации работ промышленных предприятий на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Обеспечивает разработку изделий любой степени сложности и назначения. Кроме того позволяет выполнять 3D-проектирование изделий (деталей и сборок) любой степени сложности с учётом специфики их изготовления.

Этапы создания сеточной модели, расчётной модели и поиск решения выполнен с использованием программного пакета ANSYS, который представляет собой систему анализа, применяющую метод конечных элементов для решения моделирования потоков движения жидкости и газа. Трёхмерная геометрическая модель циклона показана на рисунке 6.2.

Данные геометрии циклона, и его параметры среды приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 - Данные используемые для построения математической модели радиально-осевого циклона

Наименование параметра	Значение
Давление пара в корпусе циклона, МПа	15,6
Расход пара из циклона, кг/сек	8,1
Расход воды подпитки на циклон, кг/сек	8,1
Скорость пароводяной смеси входа в циклон, м/сек.	3,116
Температура среды в циклоне, °С	344
Внутренний диаметр циклона, м	0,6
Внутренний диаметр патрубка отвода пара из циклона, м	0,12
Количество патрубков отвода пара из циклона, шт.	1
Внутренний диаметр патрубка подвода пароводяной смеси в циклон, м	0,113
Количество патрубков подвода пароводяной смеси в циклон, шт.	7
Угол между двумя соседними соплами, °	51,428
Внутренний диаметр уравнивающего патрубка, м	0,107
Внутренний диаметр подпитывающего патрубка, м	0,12
Количество подпитывающих патрубков, шт.	1
Внутренний диаметр патрубков опускных труб, м	0,183
Количество опускных патрубков, шт.	2
Высота циклона, м	5,5
Высота расположения уравнивающего патрубка, м	5
Высота расположения сопла, м	4
Высота расположения подпитывающего патрубка, м	0,23

- **Создание сеточной модели расчётной зоны.** На основе ранее созданной трёхмерной геометрической модели радиально-осевого циклона выполняется построение сеточной модели расчётной зоны. Или разбиение рабочего объёма модели циклона, на отдельные малые ячейки (контрольные объёмы). Эта этап производится автоматически в программе ANSYS Meshing. Сеточная модель циклона показана на рисунке 7.1.

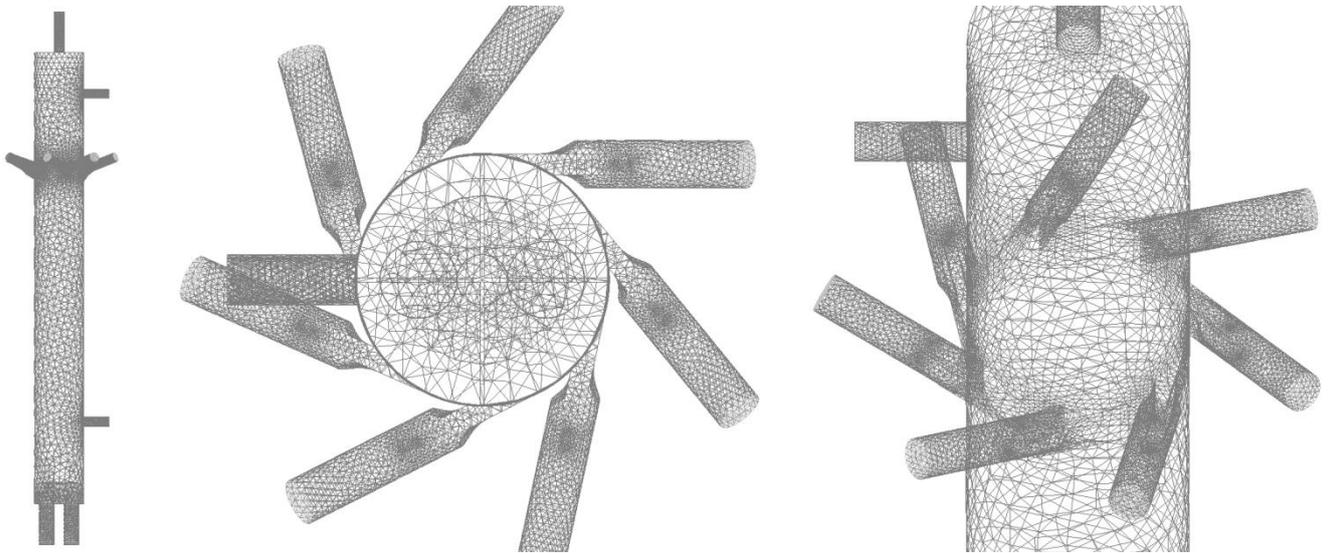


Рисунок 7.1 Сеточная модель циклона.

- **Создание расчётной модели** Расчётная модель создаётся путём дополнения сеточной модели расчётными условиями. В первую очередь, задаётся набор уравнений, которые требуется решить. Для потоков жидкости это уравнение неразрывности и уравнения моментов количества движения по двум или трём осям. Если в расчёте используется моделирование турбулентных явлений, к общему набору уравнений добавляются ещё и уравнения турбулентной модели. После определения набора решаемых уравнений указываются необходимые данные для решения сформированной системы уравнений – это условия в тех контрольных объёмах, характеристики потоков в которых известны, например, на гранях крайних ячеек расчётной области. Эти условия называются граничными. Кроме граничных условий задаются ещё и начальные параметров в каждой ячейке внутри расчётной области.

- **Поиск решения.** На данном этапе производится отыскание таких значений параметров в каждой расчётной ячейке, чтобы вся расчётная зона имела максимально верные уравнения потоков. Из-за того что начальные условия задаются с большой погрешностью, в начале решения уравнения сохранения массы (энергии, импульса, момента количества движения) в расчётной зоне не выполняются. Затем, итерационными методами программа находит для каждого контрольного объёма такие значения параметров потока, при которых все уравнения выполняются с достаточной точностью. Такой набор значений по всей расчётной зоне называется сошедшимся решением.

7.3 Результаты математического моделирования

В ходе проведения математического эксперимента были получены результаты, показанные на рисунках 7.2, 7.3, 7.4.

Анализируя работу радиально-осевого циклона можно наблюдать, что циклон обеспечивает надёжное разделение двух фаз жидкости воды и пара. Шкала градиента, показанная на рисунках, представляет собой индикатор промежуточных состояний среды от жидкости – красный свет до пара – синий цвет. На изображении модели циклона показано разделение фаз жидкости, как по высоте циклона, так и по его радиусу. Кроме процесса разделения фаз можно наблюдать направления движения жидкости и пара внутри корпуса циклона.

Однако на основании полученных результатов было установлено, что при больших паровых нагрузках происходит увеличение расхода воды подпитывающего циклон, который направлен радиально под уровень вращающейся воронки. Это приводит к её дестабилизации, отклонения от оси симметрии циклона. В некоторых случаях возможны выбросы котловой воды на высоту превышающую высоту ввода пароводяной смеси, что может привести к неконтролируемому забросу воды в пароперегреватель.

Для устранения этого недостатка в работе циклона было принято решение частично изменить конструкцию циклона: уменьшить высоту установки подпитывающего патрубка до высоты установки крестовины, под опорный диск и увеличить длину штуцера подпитывающего патрубка до оси симметрии циклона. Таким образом, подпитывающий поток воды не будет оказывать воздействия на геометрию воронки, и исказить её форму.

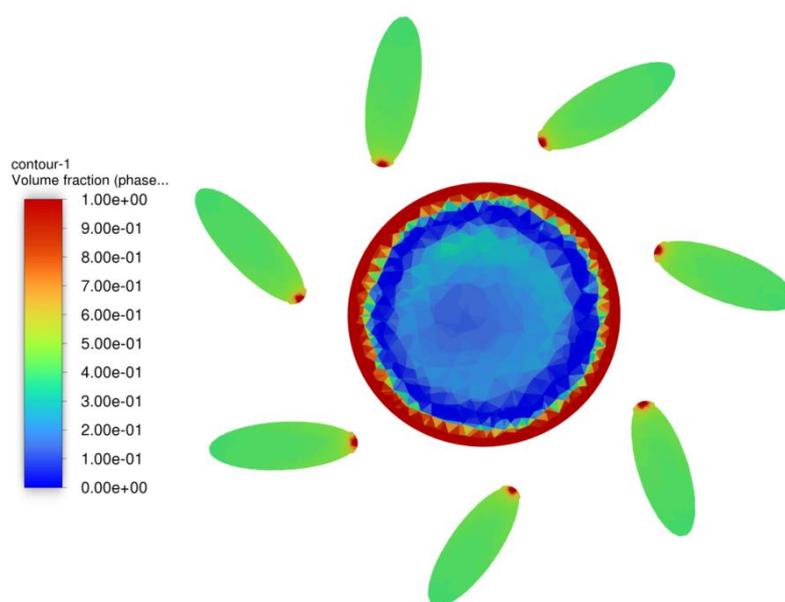


Рисунок 7.2 Поля распределения фаз вдоль горизонтальной оси циклона.

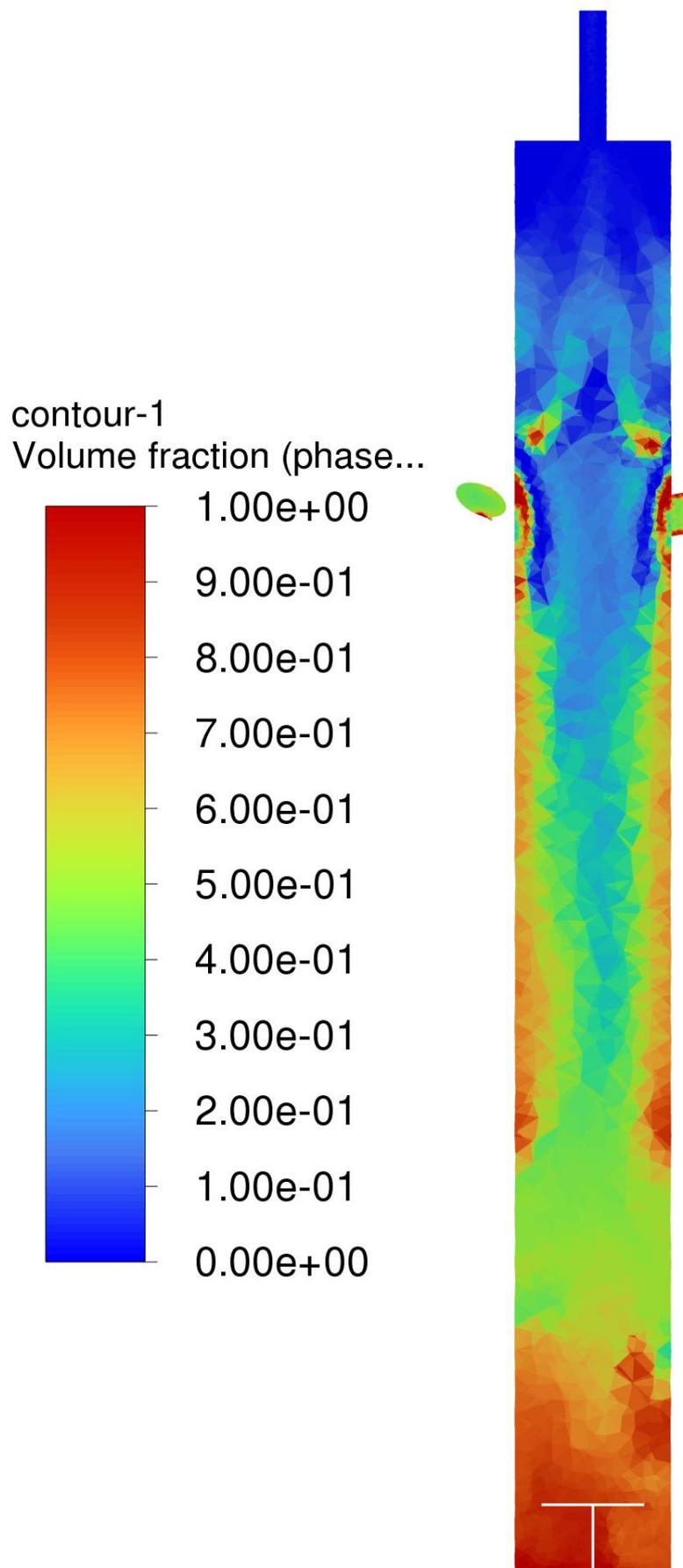


Рисунок 7.3 Поля распределения фаз вдоль вертикальной оси циклона.

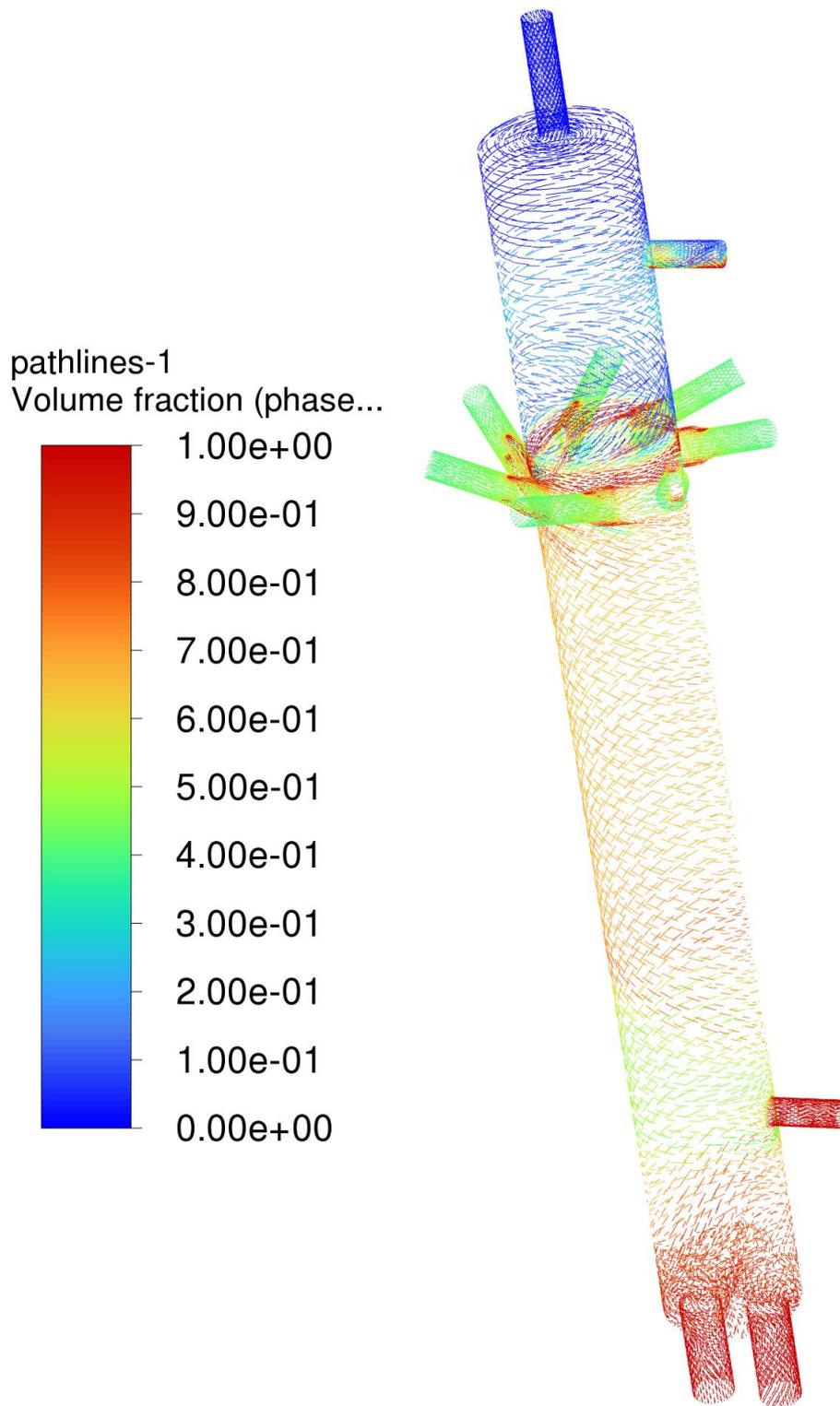


Рисунок 7.4 Векторное поле распределения скорости воды и пара.

8 Пуско-наладочные и режимные испытания

8.1 Проведение пуско-наладочных работ

После окончания проведения работ по оснащению котла радиально-осевыми циклонами требуется проведение пуско-наладочных испытаний. Основная задача пуско-наладочных испытаний - получение достоверных данных об эксплуатационной надёжности циклонов и качества пара при заданном водно-химическом режиме.

Растопка котла после проведения реконструкции проводится по режимной карте, показанной на рисунке 8.1. По ней определяется скорость подъёма давления пара в барабане (температуры насыщения) котла и порядок выполнения пусковых операций.

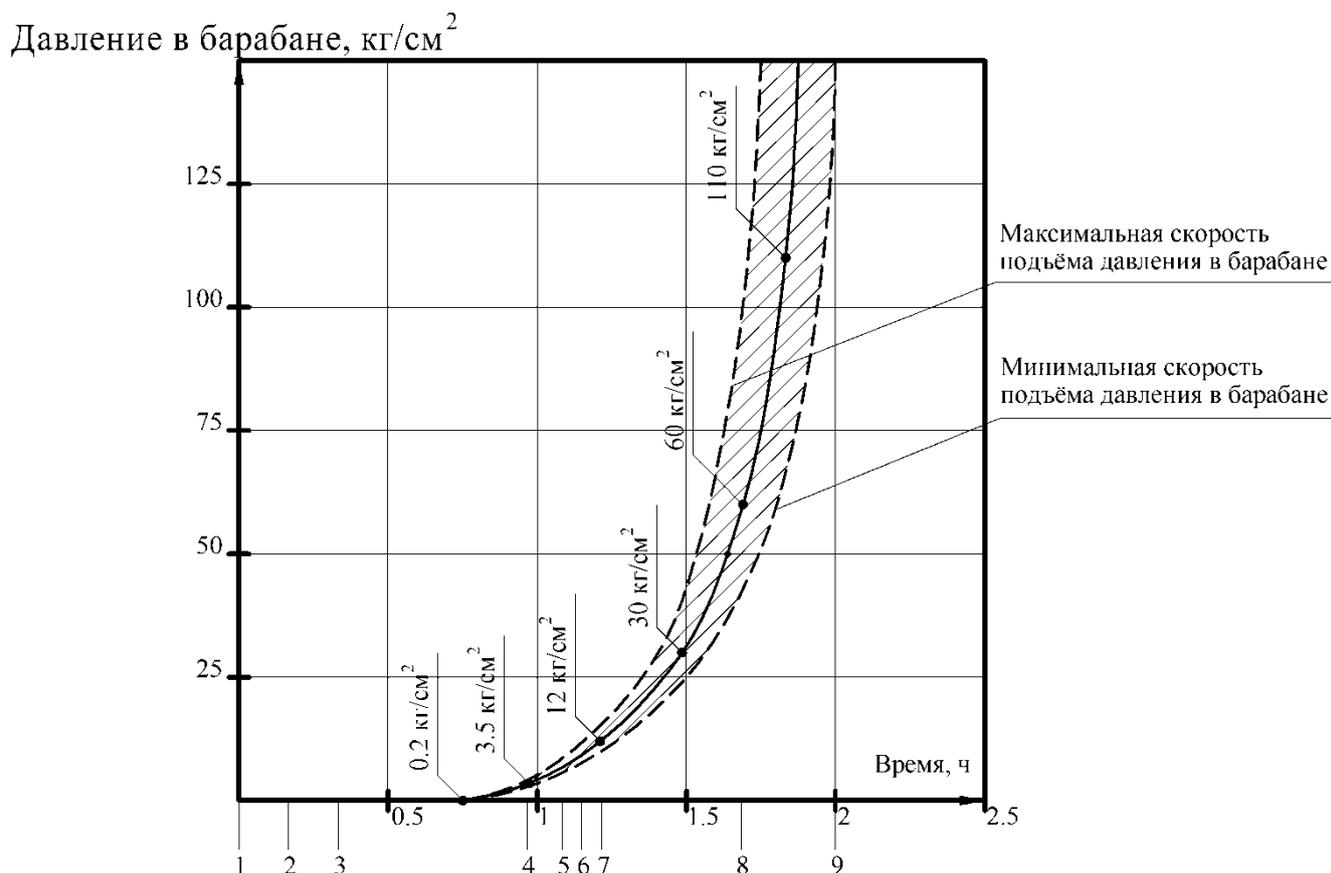


Рисунок 8.1 Режимная карта пуска котла БКЗ-420-140ПТ1 после проведения реконструкции.

Последовательность операций во время пуска котла:

1. Подготовка котла к пуску;
2. Вентиляция в топке (включение дымососов, дутьевых вентиляторов, дымососов рециркуляции газов) не менее 10 мин.
3. Отключение дымососов рециркуляции газов, розжиг растопочных мазутных форсунок;
4. Прогрев топки котла;
5. Закрытие воздушников, продувка водоуказательной колонки и нижних точек при давлении 3-4; 20-30; 50-60; 80-90 кгс/см².
6. Открытие главных паровых задвижек 203; 204 и дренажей паропровода, прогрев растопочного РОУ;
7. Включение растопочного РОУ, закрытие дренажей паропровода, кроме дренажа перед 201 задвижкой;
8. Перевод котла на пыль (включение пылепитателей при давлении ≥ 40 кгс/см² и температура газов в поворотной камере ≥ 360 °С). Включение первой пылесистемы;
9. Включение непрерывной продувки, включение второй пылесистемы, открытие байпаса на задвижке 201, включение котла в паровую магистраль, закрытие байпаса задвижки 201, закрытие задвижек продувки котла в атмосферу, отключение мазутных форсунок, включение фосфатного насоса.

8.2 Порядок проведения испытаний:

1. Опыт при нагрузке котла в диапазоне 30-60% от номинальной.
2. Подъём производительности котла до номинальной и проверка водно-химического режима.
3. Определение качества пара в диапазоне изменения нагрузки 30-100% от номинального значения.
4. Повышение солесодержания котловой воды до оптимальных значений, определяемых нормами продувки котла.

Влияние срабатывания предохранительных клапанов на уровень в циклонах. Кроме этого при пуско-наладочных испытаниях проверяют надёжность работы схемы непрерывной продувки и периодической продувок, схемы контроля качества пара и воды, работы водоуказательных устройств.

Уровень воды в уравнительной ёмкости поддерживается в диапазоне 450÷950 мм от нижней точки и ограничивается уставками технологических защит котла.

Надёжность работы пароперегревателя определяет, прежде всего, по баланс солей на входе и выходе из него.

Если общий перегрев значительно превысит расчётные значения, то необходимо принимать меры по его уменьшению [3].

8.3 Меры безопасности при проведении пуско-наладочных работ

Во время выполнения пуско-наладочных работ после проведения реконструкции, а также во время эксплуатации котла должны выполняться правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей РД 34.03.201-97 в которых предусмотрены следующие пункты:

2.3.3. Обходы и осмотры оборудования должны производиться только с разрешения дежурного персонала, ведущего режим оборудования.

2.3.4. Запрещается находиться без производственной необходимости на площадках агрегатов, вблизи люков, лазов, водоуказательных стекол, а также около запорной, регулирующей и предохранительной арматуры и фланцевых соединений трубопроводов, находящихся под давлением.

2.3.6. При пуске, отключении, опрессовке и испытании оборудования и трубопроводов под давлением вблизи них разрешается находиться только персоналу, непосредственно выполняющему эти работы.

При повышении давления при гидравлическом испытании оборудования до пробного запрещается нахождение на нем людей. Осматривать сварные швы испытываемых трубопроводов и оборудования разрешается только после снижения пробного давления до рабочего.

При расшлаковке и обдувке котла, продувке нижних точек, неустойчивых и аварийных режимах персонал должен быть удален в безопасные места.

2.3.7. При обнаружении свищей в трубах поверхностей нагрева, паропроводах, коллекторах, питательных трубопроводах, в корпусах арматуры необходимо срочно вывести работающих с аварийного оборудования, оградить опасную зону и вывесить плакаты или знаки безопасности "Осторожно! Опасная зона".

2.3.15. Запрещается эксплуатировать неисправное оборудование, а также оборудование с неисправными или отключенными устройствами аварийного отключения, блокировок, защит и сигнализации.

При отклонении режима работы оборудования от нормального, что может стать причиной несчастного случая, должны быть приняты меры по обеспечению безопасности персонала.

2.3.16. Запрещается ремонтировать оборудование без выполнения технических мероприятий, препятствующих его ошибочному включению в работу (пуск двигателя, подача пара или воды и т.п.), самопроизвольному перемещению или движению.

По окончании очистки или ремонта оборудования необходимо удостовериться в том, что в нем не осталось людей и каких-либо посторонних предметов.

2.3.20. Совпадение болтовых отверстий при сборке фланцевых соединений должно проверяться с помощью ломиков или оправок.

2.3.21. При необходимости нахождения людей вблизи горячих частей оборудования должны быть приняты меры по их защите от ожогов и действия высокой температуры (ограждение действующего оборудования, вентиляция, спецодежда и т.п.).

2.3.24. Места, опасные для прохода или нахождения в них людей, должны ограждаться канатами или переносными щитами с укрепленными на них знаками безопасности.

2.3.32. При опасности возникновения несчастного случая персонал, находящийся вблизи, должен принять меры по его предупреждению (остановить оборудование или соответствующий механизм, снять напряжение, отключить подачу пара или воды, оградить опасную зону и т.п.), а при несчастном случае оказать также доврачебную помощь пострадавшему, сохранив по возможности обстановку на месте происшествия. О случившемся должно быть сообщено старшему дежурному (руководителю работ). [12]

9 Экономическая часть

В этом разделе выполнена технико-экономическая оценка использования радиально-осевых циклонов в контуре циркуляции на примере парового котла высокого давления БКЗ-420-140ПТ1.

Одно из преимуществ метода безбарабанной растопки парового котла — это меньшее время, затрачиваемое на прогрев сепарационных устройств и поверхностей нагрева до рабочей температуры (уменьшение времени растопки котла).

В таблице 9.1 показан расчёт капиталовложений для реализации мероприятия оснащения котла радиально-осевыми циклонами.

Капитальные вложения на проведения мероприятия могут финансироваться за счет:

- собственных финансовых ресурсов (прибыли, амортизационных отчислений, средств, полученных от продажи акций, паевых и иных взносов);
- заемных (банковских кредитов, облигационных займов);
- привлеченных (средств внебюджетных фондов, средств государственных субсидий, средств иностранных инвесторов).

9.1 Определение затрат на выполнение мероприятия

Сумма затрат на реализацию мероприятия показана в таблице 9.1.

Таблица 9.1 - Определение капиталовложений на реализацию мероприятия

в тыс. руб.

Наименование оборудования или выполняемых работ	Доля от стоимости оборудования, %	Стоимость
Затраты на приобретение оборудования, 11 циклонов, (стоимость 1 циклона 800 тыс. руб.)	45	8800
Проектно-изыскательские работы, (стоимость разработки рабочей документации)	5	440
Стоимость выполнения работ по демонтажу барабана и выносных циклонов	10	880
Строительно-монтажные работы (СМР) Стоимость монтажа циклонов и несущих конструкций	35	3080
Пуско-наладочные работы	5	440
Итого, капиталовложения составили:		13640
С учётом НДС 20%:		16368

9.2 Экономические показатели

Экономический эффект достигается за счёт экономии мазута и электроэнергии затраченных на растопку котла. Основные технико-экономические показатели двух вариантов до реализации мероприятия и после, показаны в таблице 9.2. Показатели эффективности проекта показаны в таблице 9.3.

Базовый вариант, расчёт стоимости растопки котла БКЗ-420-140ПТ1 до реализации мероприятия:

Определение стоимости электроэнергии использованной на пуск котла:

$$S_{\text{ЭЛ}} = \mathcal{E}_{\text{КПУСК}}^{\text{СН}} \times \text{Ц}_{\text{СН}} \times t_{\text{П}} = 4,7 \times 1188 \times 4 = 22334,4 \text{ руб.}$$

Определение стоимости тепловой энергии использованной на пуск котла:

$$S_{\text{ТЭ}} = Q_{\text{КПУСК}}^{\text{СН}} \times C_{\text{СН}} = 23 \times 2150 = 49450 \text{ руб.}$$

Определение стоимости мазута использованного на пуск котла:

$$S_{\text{М}} = V_{\text{ПУСК}} \times \text{Ц}_{\text{ТМ}} = 37,578 \times 28149 = 1057810 \text{ руб.}$$

$$\text{где } V_{\text{ПУСК}} = V_{\text{ПУСК}}^{\text{М}} \times \frac{7}{9,5} = 51 \times \frac{7}{9,5} = 37,578 \text{ т. н. т.}$$

Определение полной стоимости пуска котла*:

$$S_{\text{ПУСК}} = S_{\text{ЭЛ}} + S_{\text{ТЭ}} + S_{\text{М}} = (22344,4 + 49450 + 1057810) \times 10^{-3} = 1130 \text{ тыс. руб.}$$

Определение годовых затрат на пуски котла:

$$S_{\text{ГПУСК}} = S_{\text{ПУСК}} \times n = 1130 \times 7 = 7907 \text{ тыс. руб.}$$

Расчёт стоимости растопки котла БКЗ-420-140ПТ1 после мероприятия внедрения метода безбарабанной сепарации пара:

Определение стоимости электроэнергии использованной на пуск котла:

$$S_{\text{ЭЛ}} = \mathcal{E}_{\text{КПУСК}}^{\text{СН}} \times \text{Ц}_{\text{СН}} \times t_{\text{П}} = 4,7 \times 1188 \times 2 = 11167,2 \text{ руб.}$$

Определение стоимости тепловой энергии использованной на пуск котла:

$$S_{\text{ТЭ}} = Q_{\text{КПУСК}}^{\text{СН}} \times C_{\text{СН}} = 23 \times 2150 = 23650 \text{ руб.}$$

Определение стоимости мазута использованного на пуск котла:

$$S_{\text{М}} = V_{\text{ПУСК}} \times \text{Ц}_{\text{ТМ}} = 18,789 \times 28149 = 518534 \text{ руб.}$$

$$\text{где } V_{\text{ПУСК}} = V_{\text{ПУСК}}^{\text{М}} \times \frac{7}{9,5} = 25,5 \times \frac{7}{9,5} = 18,789 \text{ т. н. т.}$$

Определение полной стоимости пуска котла после внедрения метода безбарабанной растопки:

$$S'_{\text{ПУСК}} = S_{\text{ЭЛ}} + S_{\text{ТЭ}} + S_{\text{М}} = (11167,2 + 23650 + 518534) \times 10^{-3} = 553 \text{ тыс. руб.}$$

Определение годовых затрат на пуски котла:

$$S'_{\text{ГПУСК}} = S'_{\text{ПУСК}} \times n = 553 \times 7 = 3873 \text{ тыс. руб.}$$

Экономический эффект от одной растопки составит:

$$\mathcal{E} = S_{\text{ПУСК}} - S'_{\text{ПУСК}} = 7907 - 3873 = 4034 \text{ тыс. руб.}$$

* - стоимостью воды и угля в расчётах не учитываются, поскольку эти значения незначительны.

Таблица 9.2 -Экономические показатели до и после реализации проекта

Наименование показателя	Значение	
	Базовый вариант	Реализация мероприятия
Расход эл. энергии на собственные нужды, МВт×ч	4,7	4,7
Цена закупки эл. Энергии на собственные нужды, Руб./МВт×ч	1188	1188
Время пусковых операций, час.	4	2
Стоимость электроэнергии использованной на пуск котла, Руб.	22334,4	11167,2
Тепловая энергия собственных нужд на пуск котла, Гкал	23	11
Стоимость 1 Гкал, Руб./Гкал	2150	2150
Стоимость тепловой энергии использованной на пуск котла, Руб.	49450	23650
Расход мазута на пуск котла, т.у.т	51	25
Цена мазута М100, Руб./т.н.т	28149	28149
Стоимость мазута, Руб.	1057810	518534
Полная стоимость пуска котла, тыс. руб.	1130	553
Среднее количество растопок котла БКЗ-420-140ПТ1	7	7
Среднегодовые затраты на растопку котла, тыс. руб.	7907	3873
Среднегодовая выручка от реализации мероприятия, тыс. руб.	-	4034
Норма амортизационных отчислений по оборудованию, %	-	6
Амортизационные отчисления, тыс. руб.	-	818
Налогооблагаемая прибыль, тыс. руб.	-	3215
Налог на прибыль по ставке 20%, тыс. руб.	-	643
Чистая среднегодовая прибыль, тыс. руб.	-	2572
Норма дисконта, %	-	15

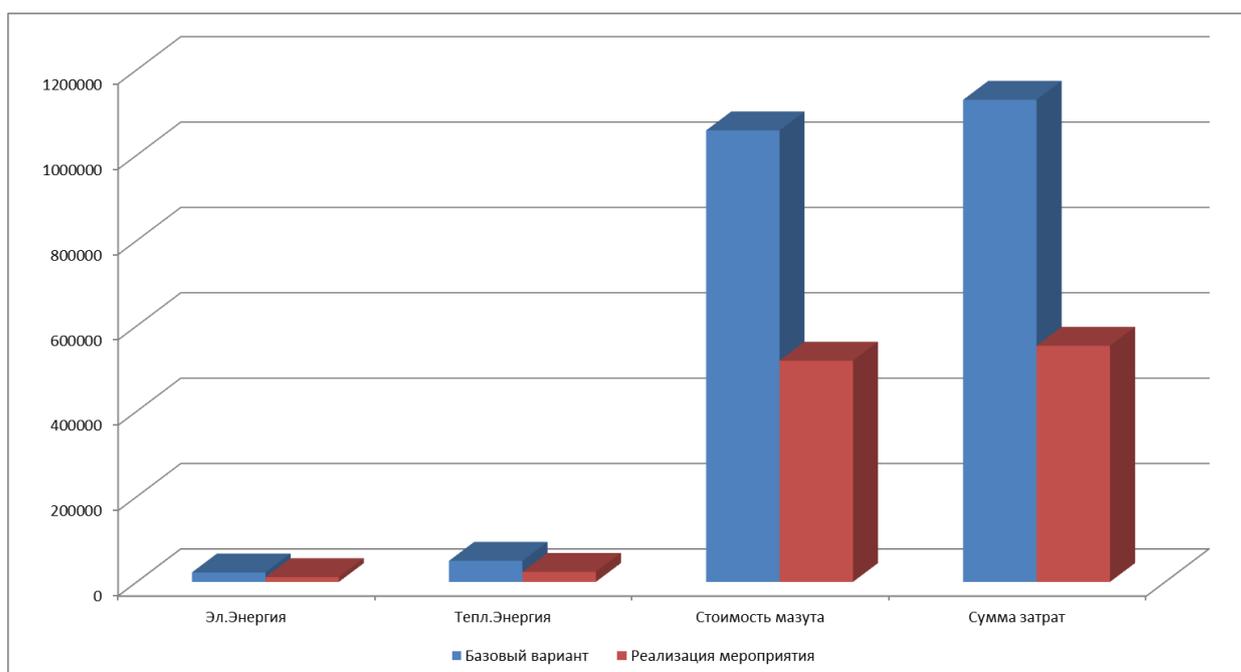


Рисунок 9.1 Затраты на растопку котла до и после реализации мероприятия.

9.3 Показатели эффективности проекта

Для оценки коммерческой эффективности проекта используются следующие показатели:

- чистый доход (ЧД);
- чистый дисконтированный доход (ЧДД);
- индекс доходности (ИД);
- внутренняя норма доходности (ВНД);
- срок окупаемости инвестиции (СОИ).

Шагом расчёта при определении показателей эффективности в пределах расчётного периода принимается один год. Горизонт расчёта измеряется количеством шагов расчёта и составляет 15 лет. Ставка дисконтирования 15%.

Таблица 9.3 - Показатели эффективности проекта

Наименование показателя	Значение
Срок окупаемости проекта PP, год	4,02
Чистые денежные поступления NPV, тыс. руб.	3381,5
Внутренняя норма доходности IRR	21%
Индекс доходности дисконтированных инвестиций DPI	1,25
Дисконтированный срок окупаемости проекта DPP, лет	9,32
Резерв безопасности проекта	6,01%

С учётом принятых капиталозатрат и прогнозируемых цен на электрическую и тепловую энергии, проект можно принять к реализации. Так как NPV больше нуля и составляет 3381 руб., резерв безопасности 6 %. Проект является доходным, так как дисконтированный индекс доходности больше единицы и составляет 1,25 (данный критерий показывает отдачу одного рубля, инвестированного в проект, инвестор получит 0,25 руб. с одного рубля, инвестированного в проект). Срок окупаемости проекта составит 4 года. Дисконтированный срок окупаемости составит 9 лет, 4 месяца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы с помощью проведенных расчетно-теоретических и экспериментальных исследований были достигнуты следующие результаты:

- В ходе выполнения поверочного тепловой расчёта котла, были получены значения параметров необходимых для выполнения гидравлического расчёта контура циркуляции: среднее тепловое напряжение экранов топки котла 109 кВт/м^2 и энтальпия воды на выходе из экономайзера второй ступени 1586 кДж/кг ;

- Выполнен расчёт контура циркуляции, в состав которого в качестве сепаратора пара входит радиально-осевой циклон. Расчёт показал, что в сравнении с объёмным сепаратором (барабаном) циклон обладает бо́льшим гидравлическим сопротивлением, что снижает скорость циркуляции до $0,77 \text{ м/сек.}$, а напор циркуляции до 5097 Па .

Тем не менее, в случае применения циклона работа контура не только возможна, но и остаётся большой запас устойчивости к застою и перевороту циркуляции;

- Разработана конструкция радиально-осевого циклона;

- Разработана гидравлическая схема циркуляции парового котла БКЗ-420-140ПТ1 с использованием радиально-осевых циклонов;

- Получены результаты проведения математического эксперимента работы радиально-осевого циклона, которые показали принципиальную работоспособность инерциального принципа (с использованием центробежной силы), и возможность его применения в качестве сепараторов пара на котлах высокого давления.

- Увеличена надёжность работы котла. Так как в радиально-осевом циклоне высота расположения пароводящего патрубка намного больше, чем в барабане. Это позволяет расширить диапазон регулировки уровня с 300 мм в случае использования барабана, до 500 мм в случае использования циклона. Кроме того, увеличено время работы котла в аварийном режиме в случае аварийного отключения подачи питательной воды до $1,4 \text{ минуты}$, за счёт большего запаса воды в уравнительной ёмкости и циклонах;

- Снижен расход мазута на растопку котла из холодного состояния с $37,6$ до $18,8 \text{ тонн}$;

- Снижено количество вредных выбросов в воздушный бассейн, за счёт уменьшения количества сжигаемого мазута во время растопки котла. Снижение

выбросов вызвано ещё и тем, что на период растопки по условиям эксплуатации электрофильтры находятся в отключенном состоянии;

- В работе показана экономическая целесообразность замены барабана на радиально-осевые циклоны на котлах высокого давления БКЗ-420-140ПТ1 находящихся в эксплуатации. При этом капиталовложения на проведение мероприятия составили 13640 тыс. руб. без НДС и 16368 тыс. руб. с НДС.

После завершения реализации мероприятия по модернизации парового котла планируемое время проведения пусковых операций сократится на два часа, это позволяет экономить на количестве используемого мазута, электрической и тепловой энергии в среднем 3391 тыс. руб. ежегодно на одну единицу оборудования. Срок окупаемости составляет 4 года.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Стандарты и другие нормативные документы

1. РД 34.03.201-97 Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей.

Книги

2. Бузников Е. Ф. Б 90 Циклонные сепараторы в паровых котлах. М., "Энергия", 1969 г. 248 с., с илл.
3. Мынкин К. П. М 94 Сепарационные устройства паровых котлов. М., "Энергия", 1971. 192с., с илл.
4. Бойко Е. А. и др. Котельные установки и парогенераторы (Расчёт естественной циркуляции в контурах барабанных котлов). Учебное пособие, Красноярск, 2006.
5. Бойко Е. А. Котельные установки и парогенераторы (конструкционные характеристики энергетических котельных агрегатов): Справочное пособие для курсового и дипломного проектирования студентов специальностей 1005 - "Тепловые и электрические станции", 1007 - "Промышленная теплоэнергетика" /Сост. Е. А. Бойко, А. А. Шпиков; КГТУ. Красноярск, 2003. 230 с.
6. Бузников Е. Ф. и др. Б 90 Комбинированная выработка пара и горячей воды /Е. Ф. Бузников, А. К. Крылов, Л. А. Лесниковский; Под ред. Е. Ф. Бузникова.-М.: Энергоиздат, 1981.-208с., ил.
7. Бойко Е. А. и др. Котельные установки и парогенераторы (учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов (курсовое проектирование)): Учебное пособие / Е. А. Бойко, Т. И. Охорзина, П. В. Шишмарёв. Красноярск: СФУ, 2008.
8. Ключев А. С. и др. К52 Наладка систем автоматического регулирования барабанных котлов/ А. С. Ключев, А. Т. Лебедев, С. И. Новиков. - М.: Энергоиздат, 1985.- 280 с., ил.

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


подпись

Е.А. Бойко

инициалы, фамилия

«24» 06 2023 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Проект безбарabanного котельного агрегата с естественной
циркуляцией высокого давления

тема

13.04.01 – теплоэнергетика и теплотехника

код и наименование направления

13.04.01.02 - энергоэффективные технологии производства

электрической и тепловой энергии

код и наименование магистерской программы

Руководитель


подпись, дата

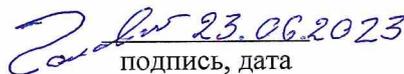
зав.кафедры ТЭС, д.т.н,

должность, учёная степень

Е.А. Бойко

инициалы, фамилия

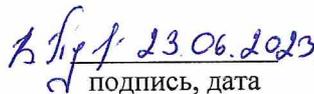
Выпускник


подпись, дата

С.В. Головин

инициалы, фамилия

Рецензент


подпись, дата

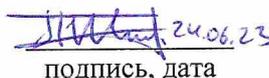
нач. ПТО КТЭЦ-2

должность, учёная степень

В.О. Пушкарев

инициалы, фамилия

Нормоконтролер


подпись, дата

П.В. Шিশмарёв

инициалы, фамилия

Красноярск 2023 г.