

Университет имени Шакарима города Семей

УДК 662.6/.9

На правах рукописи

**ХАЖИДИНОВА АКБОТА РЫСПЕКОВНА**

**Экспериментальное исследование и моделирование процессов  
теплообмена в элементах водогрейных котлов**

6D072300 – Техническая физика

Диссертация на соискание степени  
доктора философии (PhD)

Научный консультант  
кандидат технических наук, доцент  
Степанова О.А.

Зарубежный научный консультант  
доктор технических наук, профессор  
Елистратов С.Л.

Республика Казахстан  
Семей, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ</b> .....	4
<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ</b> .....	5
<b>1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ</b> .....	14
1.1 Энергосберегающие технологии. ....	14
1.2 Шлакование теплообменных поверхностей и способы их очистки .....	21
1.3 Анализ специализированного программного обеспечения .....	25
1.4 Особенности конвективного переноса теплоты .....	31
1.5 Выводы и постановка задач .....	40
<b>2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	42
2.1 Этапы проведения работы.....	42
2.2 Технические характеристики водогрейного котла КВ-Т-116,3-150 .....	43
2.3 Экспериментальное определение температуры продуктов сгорания в топочном пространстве и температуры теплообменной поверхности воздухоподогревателя.....	46
2.4 Результаты исследования теплообмена в топочном пространстве котельного агрегата КВ-Т-116,3-150 .....	51
2.5 Результаты термографического исследования поверхностей нагрева опускного газохода .....	54
2.6 Выводы по разделу.....	57
<b>3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ВЗП В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА</b> .....	59
3.1 Особенности исследования теплообмена в среде Ansys Fluent .....	59
3.2 Построение расчетной модели ВЗП котельного агрегата.....	61
3.3 Определение эффективной теплопроводности потока дымовых газов при чистой и загрязненной поверхности ВЗП.....	63
3.4 Определение расхода теплоносителей в расчетной модели.....	66
3.5 Результаты компьютерного моделирования .....	69
3.6 Выводы по разделу.....	75
<b>4 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ХВОСТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОТЛА</b> .....	76
4.1 Расчет коэффициентов теплоотдачи теплоносителей.....	76
4.2 Установление влияния загрязнений на работоспособность низкотемпературных конвективных поверхностей нагрева.....	78
4.3 Расчет аэродинамического сопротивления воздухоподогревателя водогрейного котла .....	85
4.4 Выводы по разделу.....	87
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	89
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	92
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А</b> Свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом.....	101

<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б</b> Акт внедрения результатов работы в учебный процесс ..	102
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В</b> Акт №1 о внедрении результатов работы в ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей.....	103
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г</b> Акт №2 о внедрении результатов работы в ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей.....	104
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д</b> Свидетельство обладателя гранта на поездку Фонда Первого Президента Республики Казахстан – Лидера Нации.....	105
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е</b> Диплом за участие в конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» .....	106
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Ж</b> Сертификат участия в конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» .....	107
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ И</b> Сертификат участия в XVI Конференции-конкурсе НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК .....	108
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ К</b> Диплом «Жыл докторанты» ГУ имени Шакарима города Семей.....	109

## НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В ходе выполнения диссертационной работы были использованы следующие нормативные ссылки:

Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности» от 13 января 2012 года № 541-IV (с изменениями и дополнениями по состоянию на 29.06.2020 г.).

Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Казахстан в новой реальности: время действий», г. Нур-Султан, 1 сентября 2020 года.

Свод правил Республики Казахстан СП РК 4.02-101-2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха (с изменениями от 01.08.2018 г.).

Концепция развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года. Утверждено постановлением Правительства Республики Казахстан от 28 июня 2014 года №724.

Дорожная карта по развитию угольной отрасли Республики Казахстан на 2019-2021 годы.



## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

МОН РК	-	Министерство образования и науки Республики Казахстан
ТЭС	-	тепловая электрическая станция
ТЭЦ	-	тепловая электрическая централь
КПД	-	коэффициент полезного действия
МКЭ	-	метод конечных элементов
ВЗП	-	воздухоподогреватель
КВ-Т	-	котел водогрейный твердотопливный
$d$	-	внутренний диаметр труб, м
$D$	-	наружный диаметр труб, м
$\alpha_r$	-	коэффициент теплоотдачи газов с учетом толщины загрязнений, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
$\lambda_3$	-	коэффициент теплопроводности загрязнений, Вт/(м·К)
$\lambda_{ст}$	-	коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К)
$\alpha_B$	-	коэффициент теплоотдачи воздуха, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
$d_3$	-	внутренний диаметр трубок ВЗП с учетом толщины загрязнений, м
$k_l$	-	линейный коэффициент теплопередачи при отсутствии загрязнений, Вт/(м·К)
$k_{l3}$	-	линейный коэффициент теплопередачи с учетом толщины отложений, Вт/(м·К)
$t_r$	-	температура газа, К
$t_{c1}$	-	температура внутренней поверхности стенки, К
$q_l$	-	линейная плотность теплового потока, Вт/м
$\alpha_r$	-	коэффициент теплоотдачи газа, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
$t_{c2}$	-	температура внешней поверхности стенки, К
$E$	-	энергетический показатель теплообменного аппарата, К <sup>-1</sup>
$N$	-	мощность, затрачиваемая на перемещение теплоносителей, Дж/с
$\nu$	-	кинематическая вязкость теплоносителя, м <sup>2</sup> /с
$t_0$	-	температура в центре газового потока, К
$\lambda_r$	-	коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К)
$\lambda_{эф}$	-	коэффициент эффективной теплопроводности потока газа при отсутствии загрязнений, Вт/(м·К).
$\lambda_{эфз}$	-	коэффициент эффективной теплопроводности потока газа при наличии загрязнений, Вт/(м·К)
$V_0$	-	теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива, м <sup>3</sup> /кг
$C^r$	-	содержание углерода в топливе на рабочую массу, %
$H^r$	-	содержание водорода в топливе на рабочую массу, %
$S_{д}^r$	-	содержание серы в топливе на рабочую массу, %
$O^r$	-	содержание кислорода в топливе на рабочую массу, %
$B_T$	-	расход топлива, кг/с

$G_B$	- расход воздуха, м <sup>3</sup> /с
$\rho_B$	- плотность воздуха в зависимости от температуры, кг/м <sup>3</sup>
$M_{B \text{ ПОЛН}}$	- полный расход нагретого воздуха с учетом плотности потока, кг/с
$M_B$	- расход нагретого воздуха через выбранный участок модели, кг/с
$\sum V$	- общий объем дымовых газов, м <sup>3</sup> /кг
$Z_1$	- число труб поперек потока воздуха
$Z_2$	- число труб вдоль потока воздуха
$G_G$	- расход дымовых газов с учетом расхода топлива, м <sup>3</sup> /с
$M_{G \text{ ПОЛН}}$	- полный расход дымовых газов по всем трубкам ВЗП с учетом плотности потока, кг/с
$M_G$	- расход дымовых газов через выбранный участок модели, кг/с
$Z_{\text{общ}}$	- общее число труб в ВЗП, шт
$t_{\text{ВЫХОД}}^B$	- температура воздуха на выходе из воздухоподогревателя, °С
$t_{\text{ВЫХОД}}^G$	- температура уходящих дымовых газов на выходе из воздухоподогревателя, °С
$v_{\text{ср}}^B$	- средняя скорость воздуха в ВЗП, м/с
$v_{\text{ср}}^G$	- средняя скорость газов в ВЗП, м/с
$B$	- ширина воздухоподогревателя, м
$l$	- длина воздухоподогревателя, м
$F$	- площадь живого сечения для прохода газов, м <sup>2</sup>
$\Delta h'_{\text{тр}}$	- коэффициент сопротивления трения в трубах, мм. вод. ст.
$C_{\text{ш}}$	- поправочный коэффициент на шероховатость
$\Delta h_{\text{тр}}$	- сопротивление трения в трубах, Па
$\Delta h_{\text{изм}}$	- сопротивление при входе в трубы и при выходе из них, Па
$\Delta h_{\text{ВЗП}}$	- сопротивление воздухоподогревателя, Па
$\varepsilon$	- коэффициент загрязнения поверхности, г/см <sup>2</sup>
$\rho_z$	- плотность загрязнений, г/см <sup>3</sup>
$\sigma_z$	- толщина слоя загрязнений, м
$\eta_{\text{к.а}}^{\text{бр}}$	- коэффициент полезного действия котельного агрегата, %
$\sum q_{\text{пот}}$	- сумма потерь теплоты котельного агрегата, %
$Re$	- число Рейнольдса
$Pr$	- число Прандтля
$Nu = f(Re, Pr)$	- критерий Нуссельта

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Качество работы котельного агрегата зависит от того, насколько эффективно внутри него проходят процессы теплообмена. Происходящие последовательно во всех элементах котельного агрегата теплообменные процессы взаимосвязаны между собой. На процесс горения в топочном пространстве влияет температура воздуха, подаваемого из хвостовых поверхностей нагрева. Высокая температура воздуха, поступающего в топочное пространство улучшает процесс воспламенения и горения топлива. Полное сгорание топлива в топочном пространстве уменьшает потери теплоты с механическим и химическим недожегом, предотвращает унос несгоревших частиц топлива в газоходы котла, увеличивает КПД установки. Температура поступающего в топку воздуха, в свою очередь, зависит от интенсивности теплообмена в воздухоподогревателе, где он прогревается теплотой уходящих дымовых газов. Исследованию процессов теплообмена с целью повышения эффективности котельных агрегатах уделяется особое внимание. В основном, рассматриваются теплофизические процессы в топочных устройствах, а закономерности процессов теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева, таких как экономайзеры и воздухоподогреватели, изучены в меньшей степени, а именно эти процессы в большой степени влияют на эффективность сжигания топлива. Именно рассматривая теплообменные процессы в топочном пространстве и в воздухоподогревателе можно в полной степени дать оценку работы оборудования и при необходимости внести корректировку в режимные параметры [1].

В воздухоподогревателе имеет место сложный характер теплообменных процессов, когда теплота от горячего потока продуктов сгорания топлива к стенке теплообменника передается конвективной теплоотдачей, через стенку, разделяющую потоки теплота передается теплопроводностью, а теплота от стенки в ядро холодного потока воздуха передается вновь конвективной теплоотдачей [2, (с. 5)].

В процессе эксплуатации на теплопередающей поверхности неизбежно образование различного рода загрязнений, которые ухудшают работу теплообменника [3, (с.3)]. Заращение труб отложениями уменьшает их площадь поперечного сечения и увеличивает газовое сопротивление со стороны дымовых газов, что приводит к увеличению перепада давления в теплообменнике. Эффективность теплообменных процессов в воздухоподогревателе описывается коэффициентом теплопередачи, зависящим от коэффициентов теплоотдачи, коэффициентов теплопроводности материала стенки и загрязнений, а также конструктивных особенностей теплопередающей поверхности [2, (с. 253)].

Коэффициент теплопроводности загрязнений (отложений из дымовых газов) существенно ниже коэффициента теплопроводности материала труб ВЗП, вследствие этого наличие отложений на трубах конвективных поверхностей нагрева уменьшает интенсивность теплоотдачи от омывающих их дымовых газов [3, (с. 9)]. Кроме того, под слоем загрязнений возможно

образование коррозии теплообменника, что может привести к выводу его из строя. Загрязнения на поверхности труб воздухоподогревателя оказывают значительное влияние на продолжительность эффективной работы котельного агрегата и его экономические показатели.

Формирование отложений на конвективных поверхностях нагрева в большой степени зависит от температуры газозолового потока, температуры поверхности теплообмена, химического состава летучей золы, диаметра и расположения труб (коридорное или шахматное) а также аэродинамических условий [3, (с. 11)]. Температура поверхности влияет на количество выпадающего конденсата раствора серной кислоты и паров воды, усиливающих золовой занос. Меньшее влияние оказывает направление потока дымовых газов [4].

Эксплуатация котельного агрегата ведется на основе режимных карт, которые составляются по результатам эксплуатационных (балансовых) испытаний, целью которых является установление оптимальных условий работы топки и конвективных поверхностей нагрева, определение оптимального избытка воздуха и тонкости размола угольной пыли при разных нагрузках, максимально допустимой и минимальной устойчивой нагрузки котла, тепловых потерь при работе котла. Разработка и усовершенствование режимных карт работы энергетического оборудования, созданных на основе исследования процессов теплообмена, позволяет существенно оптимизировать процесс работы котельного оборудования, уменьшить степень его техногенного воздействия [5]. Однако, исследование теплофизических процессов, возникающих в топочном пространстве и хвостовых поверхностях нагрева осложняется множеством особенностей объектов исследования. Сложный характер процессов теплообмена во всех элементах котельных агрегатов делает необходимым комплексное теоретическое и экспериментальное изучение протекающих в них процессов.

**Целью диссертационной работы** является повышение эффективности работы котельного агрегата на основании установления влияния загрязнения низкотемпературных поверхностей нагрева на интенсивность конвективного теплообмена при сжигании непроектного топлива с помощью экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Построение изотермических поверхностей топки котла.
- Определение степени черноты и термографическое исследование воздухоподогревателя.
- Разработка содержательной постановки задачи моделирования и установление граничных условий процессов теплообмена низкотемпературных хвостовых поверхностей нагрева.
- Установление характера изменения зависимостей температур теплоносителей и интенсивности теплообмена (коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи) от степени загрязнения в низкотемпературных конвективных поверхностях нагрева.

– Установление критерия периодичности очистки воздухоподогревателя и влияния газодинамического характера течения среды на эффективность работы котла при изменении температурно-временного воздействия.

**Объект исследования** – конвективный трубный пучок воздухоподогревателя котла с учетом изменения проходных сечений при различной степени загрязненности трубок отложениями из дымовых газов.

**Предмет исследования** – процессы теплообмена в высокотемпературных и низкотемпературных поверхностях нагрева котельного агрегата КВ-Т-116,3-150.

**Методы исследования.**

Для изучения процессов теплообмена в элементах котельного агрегата применялись следующие методы исследования:

- пирометрическое обследование топочного пространства котельного агрегата при разной теплопроизводительности;
- термографическое исследование поверхности нагрева опускного газохода;
- исследование теплофизических процессов с использованием программного комплекса Ansys Fluent на основе метода конечных элементов.

В экспериментальных исследованиях применены дистанционный термографический и контактный методы измерения температуры поверхности воздухоподогревателя, что позволило совместить преимущества панорамного мгновенного метода измерения температуры с высокоточным методом.

**Научная новизна работы** заключается в том, что впервые:

- разработана новая методика расчета теплофизических параметров процесса теплообмена на базе программного комплекса Ansys Fluent, позволяющая получить полное описание сложных процессов теплопередачи в воздухоподогревателе котельного агрегата. В разработанной расчетной трехмерной теплофизической модели рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя отсутствует стенка трубок, создаваемое термическое сопротивление стенки учитывается введением коэффициента эффективной теплопроводности потока дымовых газов  $\lambda_{эф}$ . Результаты компьютерного моделирования процесса теплообмена в воздухоподогревателе хорошо согласуются с имеющимися фактическими данными, относительное отклонение результатов вычислений не превышает 3%. Разработанная компьютерная модель защищена свидетельством о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №14347 от 11.01.2021 г;

- определены теплофизические характеристики процесса теплообмена в рекуперативном трубчатом воздухоподогревателе с учетом состояния хвостовых конвективных поверхностей нагрева при работе котла на непроектном топливе;

- установлены зависимости коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в воздухоподогревателе от степени загрязнения низкотемпературных конвективных поверхностей нагрева при работе котла на непроектном топливе;

- определено влияние газодинамического характера течения среды на эффективность работы котла при изменении температурно-временного воздействия;

- получена полная пространственная картина процесса теплообмена в рекуперативном воздухоподогревателе котельного агрегата, реализованы различные сценарии работы теплообменника в зависимости от загрязненности поверхности теплообмена.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1 Особенности характера распределения температурных полей по высоте топки водогрейного котла при отклонении от номинальной мощности.

2 Результаты компьютерного моделирования интенсивности теплообмена в низкотемпературных конвективных поверхностях нагрева в зависимости от степени загрязнения.

3 Закономерности влияния газодинамики потока теплоносителей на эффективность конвективного теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева котла.

#### **Научная и практическая значимость.**

Результаты диссертационного исследования направлены на решение острых практических проблем. Использование непроектного топлива в современных котельных агрегатах ставит задачу исследования процессов теплообмена в газоходах котла с целью повышения эффективности работы теплоэнергетического оборудования, продуктивного использования топливных ресурсов и снижения техногенного воздействия на окружающую среду.

Разработана новая трехмерная компьютерная модель, позволяющая быстро и точно определять теплофизические характеристики интенсивности теплообмена в воздухоподогревателе, контролировать периодичность очистки теплообменника для устранения возможных причин снижения интенсивности теплообмена, что способствует повышению эффективности работы котельной установки. Предложенный способ исследования процессов теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева водогрейного котла является наиболее перспективным среди множества путей повышения КПД современных котельных установок. Компьютерная модель применима для расчётов процесса теплообмена в воздухоподогревателях других котельных агрегатов, при использовании непроектных топлив, а также изменении качественного состава топлива.

На основании результатов компьютерного моделирования процесса теплообмена разработаны режимные карты эксплуатации воздухоподогревателя в виде номограмм и графиков определяющих оптимальную работу теплообменника. Номограммы позволяют прогнозировать КПД котельного агрегата в зависимости от теплопроизводительности, скорости нагретого воздуха, температуры уходящих дымовых газов с учетом состояния теплообменной поверхности.

Установлен критерий периодичности очистки воздухоподогревателя от отложений регламентирующий интервал очистки, в виде критического значения температуры уходящих дымовых газов.

Внедрение результатов научно-исследовательской работы в процесс эксплуатации водогрейного котла КВТ-116,3-150 позволило оптимизировать работу агрегата, увеличить продолжительность его бесперебойной работы и годовой коэффициент рабочего времени.

#### **Связь работы с научно-исследовательскими проектами.**

В рамках программы финансирования и поддержки талантливой молодежи Фонд Первого Президента РК - Лидера Нации Нурсултана Назарбаева спонсировал поездку для участия в 23 ежегодной Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в секции «Теплофизика» (Московский энергетический институт, г. Москва, РФ). Результаты исследования внедрены в учебный процесс и на производстве. Свидетельство обладателя Гранта на поездку, Акты о внедрении результатов исследований представлены в Приложении к диссертации.

#### **Личный вклад автора** включает:

- постановку цели и задач исследования;
- разработку экспериментальной методики и проведение опытов по пирометрическому и термографическому исследованию процессов теплообмена в элементах котлоагрегата;
- разработку и верификацию компьютерной и математической моделей ВЗП;
- анализ совместно с научными консультантами полученных результатов и формулировку основных выводов;
- разработку практических рекомендаций.

**Степень обоснованности и достоверности результатов, полученных в работе,** обеспечивается применением проверенных стандартных методов исследования, многократным проведением экспериментов, использованием современных высокоточных измерительных приборов и установок, применением лицензионной программы Ansys Fluent 14.5, сопоставлением большого объема экспериментальных данных с полученными ранее результатами исследований в странах СНГ и дальнего зарубежья.

Результаты исследований прошли публичную апробацию: опубликованы в научных журналах, доложены и представлены автором на республиканских и международных конференциях. Экспериментальные исследования по теме диссертационной работы проводились на действующем котельном агрегате ТЭЦ-1 города Семей в условиях его реальной работы, компьютерное моделирование проводилось на базе лаборатории «Экспериментальной теплофизики» Института атомной энергии НЯЦ РК (город Курчатов).

#### **Апробация результатов работы.**

Материалы диссертационной работы доложены на следующих международных и республиканских конференциях:

1. IV Российской молодежной научной школе-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи», г. Томск, РФ, 1-3 ноября 2016 г.;

2. V Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, РФ, 2017 г.;

3. Международной научно-практической конференции «Научные достижения и открытия современной молодёжи», г. Пенза, РФ, 2017 г.;

4. 23 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, г. Москва, Российская Федерация, 2-3 марта 2017 г.;

5. XVI Конференции-конкурсе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, РК, 3-5 мая 2017 г.;

6. Международной научно-практической конференции «Проблемы обеспечения продовольственной безопасности Казахстана в условиях глобализации», посвященной 60 – летию доктора технических наук, профессора Амирханова К. Ж., г. Семей, РК, 15 сентября 2017 г.;

7. Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы производства продуктов питания: состояния и перспективы развития, посвященной 75-летию член-корреспондента КазАСХН, доктора технических наук, профессора Е.Т. Тулеуова, РК, г. Семей, 24 ноября 2017 г.;

8. 24 ежегодной Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», МЭИ, г. Москва, Российская Федерация, 15-16 марта 2018 г.;

9. 11-й Международной научно-практической конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» 22 – 23 ноября, 2019 г. Карагандинский Государственный университет имени академика Е.А. Букетова, Караганда;

10. Международной образовательной онлайн-конференции «Образование – основа евроазиатского сотрудничества», посвященная 85-летию Университета Шакарима. – Семей: Государственный университет имени Шакарима города Семей, 2019.

Соответствующие дипломы и сертификаты участия представлены в Приложении к диссертации.

Результаты диссертационной работы обсуждались на научных семинарах учебной кафедры технической физики и теплоэнергетики НАО «Университет имени Шакарима города Семей» и кафедре тепловых электрических станций Новосибирского Государственного Технического Университета (Российская Федерация).

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы изложены в 18 печатных работах. В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК опубликовано 5 статей, в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science – 1 (квартиль Q2), получено 1 свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа изложена на 100 страницах и состоит из введения, четырех разделов, заключения и списка



использованных источников из 121 наименования. В диссертационной работе представлены 40 рисунков и 8 таблиц.

# 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

Настоящий раздел посвящен обзору современных проблем теплоэнергетики в мире и в частности Республике Казахстан, основные положения раздела опубликованы в следующих работах [6 – 9].

## 1.1 Энергосберегающие технологии.

Энергетика является фундаментальной составляющей ресурсной базы для всех областей человеческой деятельности. Устойчивое развитие государства невозможно без этого мощнейшего сектора экономики [10]. В Послании Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана отмечено, что важнейшей задачей, стоящей перед нашей страной, является полное раскрытие своего промышленного потенциала [11].

Проблема обеспечения человечества топливом и энергией или *глобальная энергетическая проблема* является одной из наиболее важных тем современности [6]. Эффективность использования энергоресурсов по-прежнему остается очень низкой. К примеру, из каждой добытой тонны горючих ископаемых в полезную энергию превращается лишь третья часть. Остальное топливо либо теряется при добыче, обогащении, транспортировке и преобразовании, либо бессмысленно тратится у конечного потребителя (около 60% потерь энергоресурсов связано с их конечным потреблением) [12, 13]. Важной проблемой является результат процесса преобразования энергии в электричество и тепло, а именно загрязнение атмосферы вредными окислами газов, загрязнение почвы при транспортировке энергоносителей и захоронении отходов, тепловое загрязнение водоемов и многое другое. В настоящее время решения вышеназванных проблем относят к *приоритетным направлениям развития науки и техники* Республики Казахстан. На рисунке 1 представлены пути решения глобальной энергетической проблемы [6, (с. 271)].

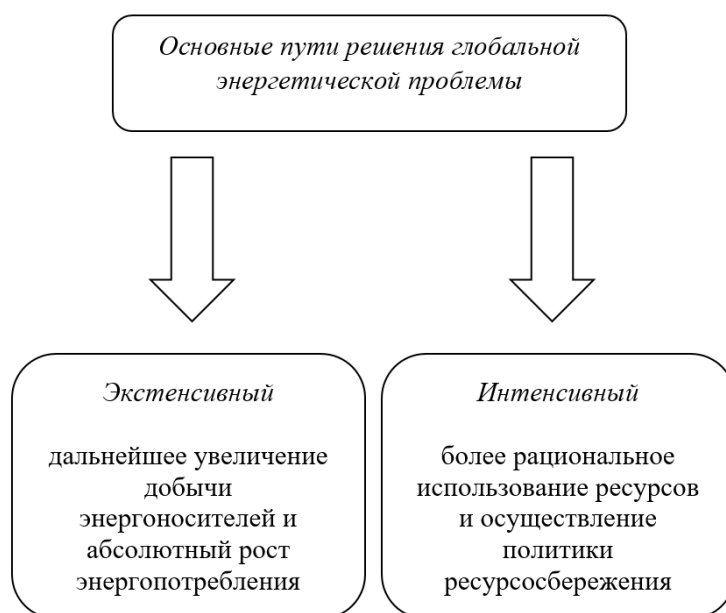


Рисунок 1 – Пути решения глобальной энергетической проблемы

Несомненно, решение энергетической проблемы должно идти интенсивным путем. Вопросы проведения рационального использования ресурсов в современном мире имеют важное народно-хозяйственное значение, основная их задача заключается в снижении бесполезных потерь энергии путем введения энергосберегающих технологий [14, 15, 16].

Под энергосберегающими технологиями подразумевается применение современных технологий и методов, позволяющих повысить эффективность использования топливно-энергетических ресурсов [13, (с. 238 – 250)]. Политика ресурсосбережения проявляется также в разработке и применении альтернативных источников энергии [17, 18, 19]. Все же главная проблема внедрения новых технологий и методов заключается в высоких экономических вложениях на их реализацию. Внедрение инноваций требует детально проработанной системы их стимулирования и финансирования [20, 21].

Согласно исследованиям ученых различных стран, в ближайшие годы развитие энергетики неразрывно будет связано с использованием угольных технологий, что обосновано его большими мировыми запасами, оцениваемыми в 826 млрд. тонн. Превалирующую часть (90% мирового энергетического потенциала) всех пригодных для разработки полезных ископаемых, имеющих органическое происхождение, занимает уголь. Разведанные запасы угля в Республике Казахстан составляют 34 млрд. тонн, что равняется 4% от всего мирового запаса [22, 23].

Уголь занимает ведущее место в структуре топливно-энергетического комплекса страны [24]. Республика Казахстан входит в десятку мировых стран, которые являются лидерами по углепромышленным показателям [25, 26]. Среди стран СНГ наша страна занимает 3 место по запасам и добыче угля и 1 место - по добыче угля на душу населения. На рисунке 2 представлена добыча угля в РК за январь – октябрь 2021 года [25].

За январь – октябрь 2021 года в РК добыли 92,6 млн тонн каменного угля, включая лигнит и угольный концентрат, что превышает добычу угля на 1,6 % за аналогичный период прошлого года [25]. В Казахстане имеются большие запасы коксующегося угля (порядка 5,2 млрд. тонн). С учетом планов по вводу и выбытию генерирующих мощностей Республики Казахстан потребность в угле продолжит расти: к 2030 году мощность новых угольных электростанций составит 20% от совокупной установленной мощности, при этом доля старых сократится с текущих 60% до 39% [26].

В целях развития угольной промышленности страны была разработана и утверждена «Дорожная карта по развитию угольной отрасли Республики Казахстан на 2019-2021 годы» [27].

Рынок энергетического угля в основном представлен следующими компаниями: «ENRC» (разрез «Восточный», «Шубарколь Комир»), «Самрук-Энерго», «РУСАЛ» («Богатырь Комир»), «Казахмыс», «Ангренсор-Энерго». Наиболее прибыльные месторождения угля в Казахстане находятся в центральной и северной частях страны. Несмотря на это также интенсивно разрабатываются новые месторождения, одним из которых является разрез Каражыра Восточно-Казахстанской области [25].

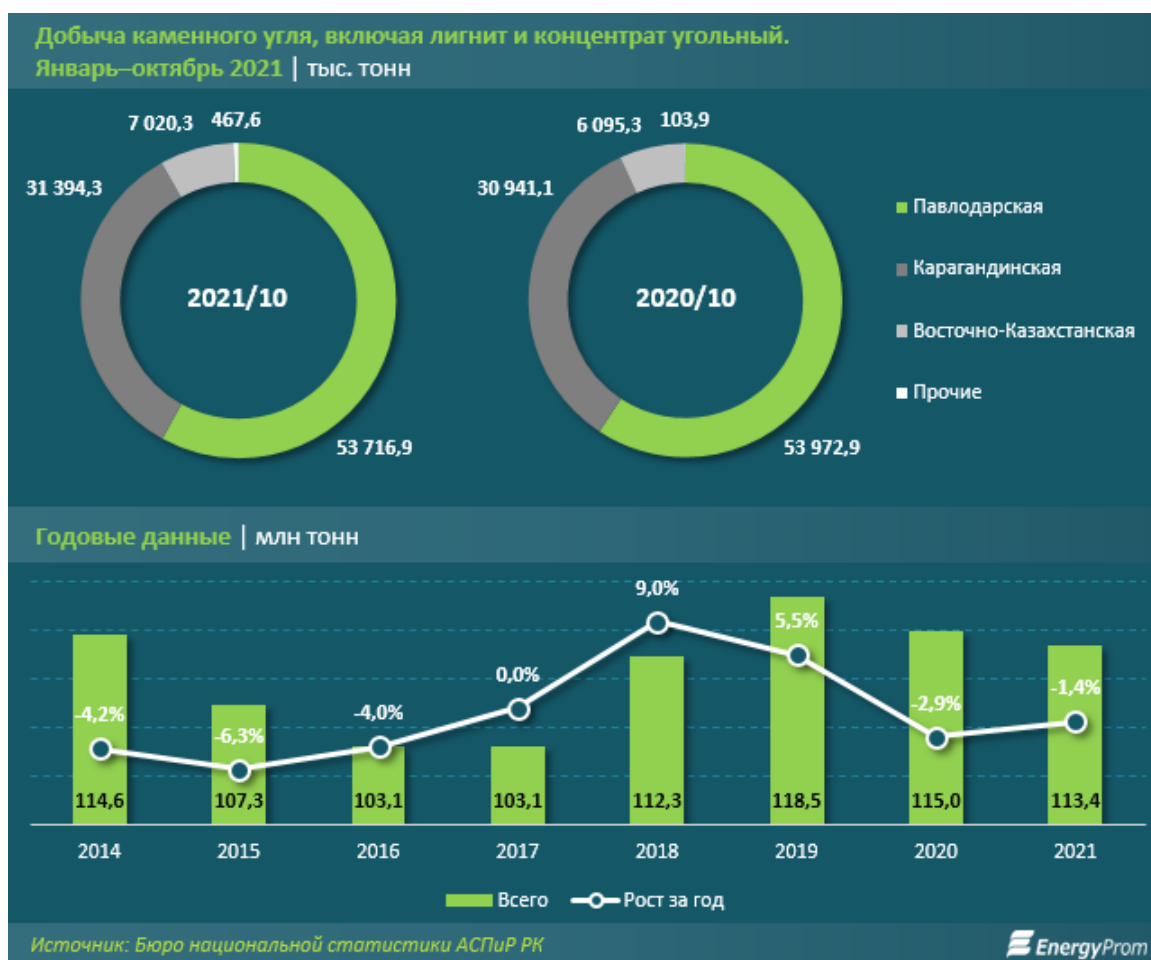


Рисунок 2 – Добыча угля, включая лигнит и концентрат угольный в Республике Казахстан за период январь – октябрь 2021 [25]

В состав угля входят органические и минеральные компоненты. Органические компоненты богаты главным горючим элементом углеродом, в результате чего уголь широко используется как топливо в энергетике. Минеральные компоненты обладают меньшей теплотворной способностью и при сжигании преобразуются в золу и шлак, поэтому высокое содержание минералов снижает качество угля [28]. При использовании угля большое внимание отводится экологическим аспектам, так как именно сжигание данного топлива является источником большого количества выбросов, негорючая часть топлива складывается в шлако-золоотвалах.

В связи с использованием традиционных источников энергии ключевыми процессами при производстве тепловой и электрической энергии являются процессы горения топлива и теплообмена [29]. На сегодняшний день разработаны эффективные технологии сжигания топлива в топочном пространстве, целью которых является снижение выбросов вредных веществ и эффективное топливоиспользование. Сжигание твердого топлива в топочном пространстве, возможно несколькими способами: слоевой, факельный (камерный), вихревой, в кипящем слое [8, (с. 246)]. Каждый из способов

сжигания топлива имеет свои преимущества и недостатки, а их использование обосновывается в каждом конкретном случае [30].

В последние годы для сжигания в котельных все чаще используется **непроектное топливо**, т.е. топливо на которое ранее не проводились тепловые расчеты оборудования [31, 32]. При сжигании непроектного топлива возникает необходимость контроля и снижения интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, уменьшения уровня вредных выбросов, повышения эффективности работы котла [33, 34].

Эффективность работы котельного агрегата, характеризуется коэффициентом полезного действия и зависит от ряда потерь. Для угля это будут потери с теплом уходящих газов  $q_2$ , от химической  $q_3$  и механической  $q_4$  неполноты сгорания, через ограждающие конструкции  $q_5$  и с физическим теплом шлаков  $q_6$  [28, (с. 86)]. Коэффициент полезного действия котельного агрегата, определяется по методу обратного баланса [35]:

$$\eta_{к.а}^{бр} = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6 \quad (1)$$

В современных котельных агрегатах с камерным сжиганием твердого топлива потери тепла от химической и механической неполноты сгорания составляют порядка 1 ÷ 5%. Потери тепла через ограждающие конструкции и с физическим теплом шлаков обычно не превышают 3%. Основное место среди вышеназванных тепловых потерь котла занимают потери с теплом уходящих дымовых газов  $q_2$ , которые составляют 5 ÷ 12 % располагаемой теплоты. Такие потери возникают из-за того, что физическая теплота газов, покидающих котел, превышает физическую теплоту поступающих в котел воздуха и топлива [36, 37].

Потери тепла с уходящими дымовыми газами согласно [28, (с. 87)] определяются:

$$q_2 = \frac{(\sum Vc) \cdot t_{yx} - Q_B}{Q_H^p} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $(\sum Vc) \cdot t_{yx}$  – теплосодержание уходящих газов ккал/кг;  
 $Q_B$  – теплосодержание поступающего в топку воздуха, ккал/кг;  
 $Q_H^p$  – низшая теплота сгорания в топливе на рабочую массу.

Теплосодержание поступающего в топку воздуха определяется как [28, (с. 87)]:

$$Q_B = a \cdot V_0 \cdot C_B \cdot t_B, \quad (3)$$

$C_B$  – теплоемкость воздуха, ккал/м<sup>3</sup>;  
 $t_B$  – температура воздуха.

Потери тепла значительные и необходимо выявлять пути, которые позволяют их сократить. В первую очередь, этому способствует интенсификация процессов теплообмена в газоходах котельных агрегатов. Повышение эффективности теплообмена достигается путем конструктивных изменений оборудования, применения новых материалов, выбора оптимальных режимов работы оборудования и совершенствования процесса производства [6, 7].

Все поверхности нагрева котельного агрегата подразделяются на три основные группы: испарительные, пароперегревательные и экономайзерные, которые располагаются в зависимости от назначения [8, (с. 246)]. В топке (или сразу за топкой) находятся *испарительные* поверхности, которые служат для нагревания воды до температуры равной температуре насыщения и получения насыщенного пара. *Пароперегревательные* поверхности располагаются за топкой и в них получают перегретый пар (с температурой выше температуры насыщения для данного давления) [9, (с. 94)]. *Экономайзерные* поверхности относят к хвостовым поверхностям нагрева, в них уходящие газы нагревают питательную воду.

В топочном пространстве котельного агрегата имеет место сложный теплообмен, включающий теплообмен излучением, конвекцией и теплопроводностью. На рисунке 3 внешняя поверхность стенок трубок топки соприкасается с горячими газообразными продуктами сгорания, имеющими температуру  $t_g$ , и нагревается до температуры  $t_1$ , а внутренняя омывается водой с температурой  $t_b$  и имеет температуру  $t_2$ . Температура в стенках трубок снижается в направлении оси  $x$  [9, (с. 94)].

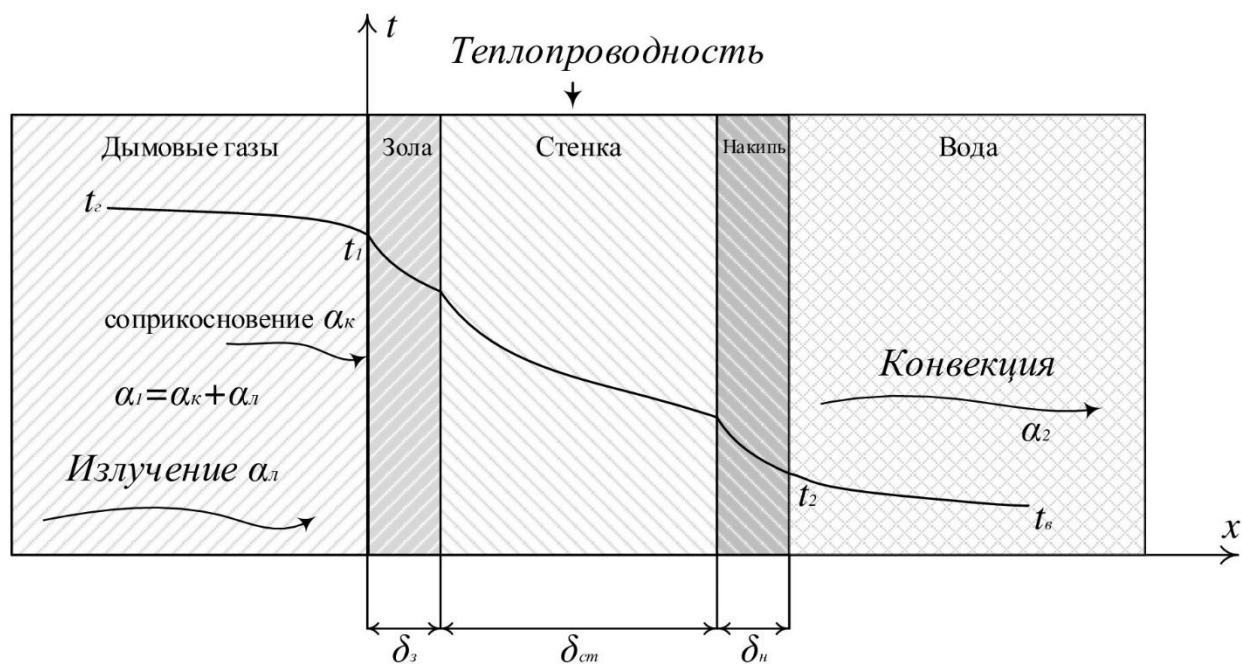


Рисунок 3 – Передача теплоты в топке от газообразных продуктов сгорания к стенке водогрейного котла [9]

Передача теплоты от продуктов сгорания к внешней поверхности стенок трубок в топочном пространстве осуществляется излучением и конвекцией. Далее теплота через слой налипшей золы толщиной  $\delta_3$ , металлическую стенку трубы толщиной  $\delta_c$  и слой накипи  $\delta_n$  передается теплопроводностью. Наконец, вода внутри трубок нагревается за счет конвекции [9, (с. 94)]. Аналогичным образом осуществляется теплопередача тепла в экономайзере энергетического котла от дымовых газов к питательной воде, поступающей в котел с той лишь разницей, что температура дымовых газов в этом случае будет значительно меньше температуры факела и конвективный механизм передачи тепла будет определяющим в процессе сложного теплообмена. Помимо экономайзера, к хвостовым поверхностям нагрева относят воздухоподогреватель.

Воздухоподогреватель (ВЗП) – это устройство, обогреваемое продуктами сгорания и предназначенное для подогрева воздуха, поступающего в топку на горение [28, (с. 130)]. В воздухоподогревателе котельного агрегата при нагреве воздуха дымовыми газами процесс теплопередачи является результатом совокупного действия конвекции, теплопроводности и радиации, однако основным процессом передачи тепла является конвекция в газовой среде и теплопроводность через стенку трубы (рисунок 4). В настоящее время широко применяются рекуперативные трубчатые воздухоподогреватели с диаметром 40 мм при толщине стенки 1,5 мм [9, (с. 94)].

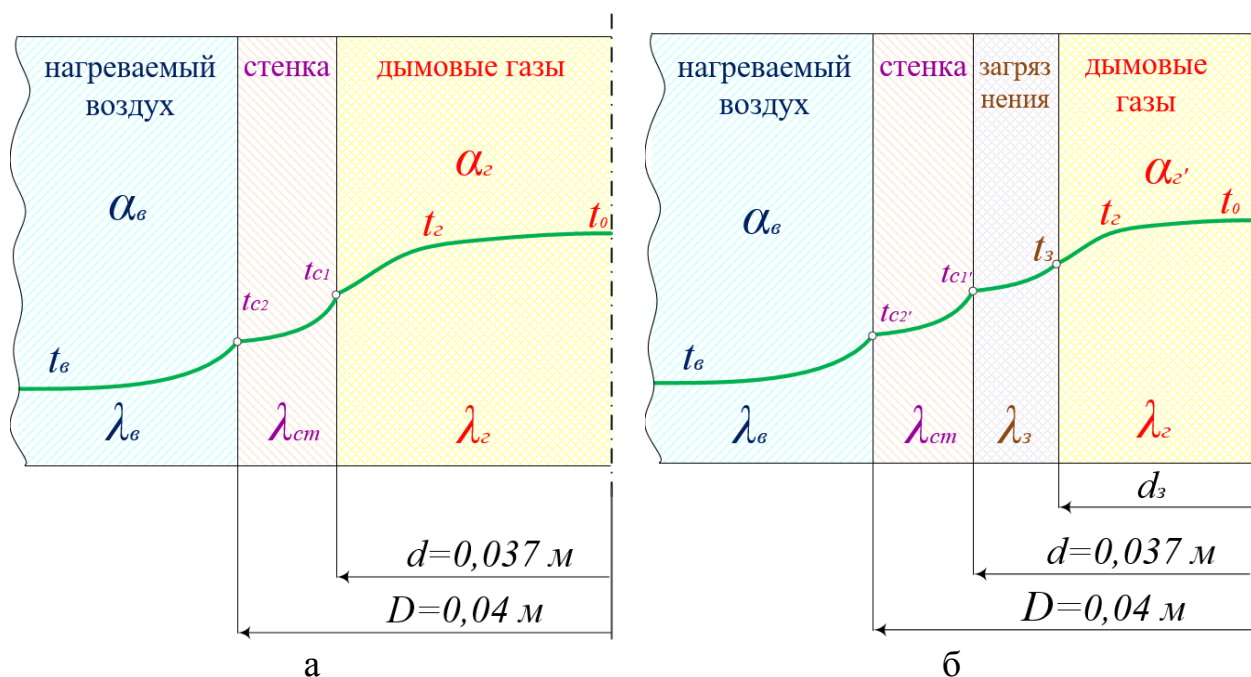


Рисунок 4 – Передача теплоты в ВЗП при отсутствии (а) и при наличии (б) отложений из газообразных продуктов сгорания на поверхности стенки

При отсутствии отложений из дымовых газов внутренняя поверхность стенок трубок ВЗП соприкасается с горячими газообразными продуктами сгорания, имеющими температуру  $t_g$ , и нагревается до температуры  $t_{c1}$ , а внешняя омывается воздухом и имеет температуру  $t_b$ . Линейный коэффициент

теплопередачи при отсутствии отложений на поверхности теплообмена  $k_l$ , (Вт/м·К) определяется по формуле 4 [2, (с. 34 -63)]:

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_r d} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_B D}} \quad (4)$$

где  $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи со стороны дымовых газов, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d$  – внутренний диаметр трубок;

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

$D$  – наружный диаметр трубок; м

$\alpha_B$  – коэффициент теплоотдачи к воздуху, (Вт/м<sup>2</sup>·К);

При наличии загрязнений на поверхности трубок теплота от дымовых газов к воздуху передается через дополнительный слой отложений, удельная теплопроводность которых  $\lambda_3$  существенно ниже проводимости стенок труб  $\lambda_{ст}$ . Линейный коэффициент теплопередачи при наличии отложений на поверхности теплообмена  $k_{l3}$ , (Вт/м·К) описывается соотношением [2, (с. 34 - 63)]:

$$k_{l3} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{r'} d_3} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{d}{d_3} + \frac{1}{2\lambda_{ст}} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\alpha_B D}} \quad (5)$$

где  $\alpha_{r'}$  – коэффициент теплоотдачи со стороны дымовых газов с учетом загрязнений, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$d_3$  – внутренний диаметр труб с учетом толщины загрязнений, м;

$\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности загрязнений, Вт/(м·К).

Как результат, температура стенок труб увеличивается за счет резкого снижения теплопередачи, в результате труба может выйти из строя. Неэффективный процесс теплопередачи требует сжигания гораздо большего количества топлива, что ведет к его перерасходу. Нарастание золовых отложений внутри трубок приводит к интенсивному сужению газовых каналов, что приводит к увеличению скорости потока дымовых газов в пучке и как следствие – увеличению его аэродинамического сопротивления.

Процесс конвективного теплообмена между поверхностью и окружающей средой в процессе охлаждения и нагревания тела характеризуют граничные условия третьего рода, которое можно записать в виде [2, (с. 46 - 63)]:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda}(t_c - t_{ж}) \quad (6)$$



где  $n$  – нормаль к поверхности тела, индекс «с» указывает на то, что температура и градиент относятся к поверхности тела.

$\frac{\partial t}{\partial n}$  – градиент температуры, К/м.

Отложения из дымовых газов создают дополнительное термическое сопротивление что приводит к снижению передачи тепла [5, (с. 964)]. Загрязнение поверхностей нагрева отрицательно сказывается как на состоянии и работе оборудования, так и в целом на вопросах их экономичности и воздействия на окружающую среду, поэтому вопрос шлакования поверхностей нагрева теплообменных аппаратов сохраняют свою актуальность [8, (с. 248)].

## **1.2 Шлакование теплообменных поверхностей и способы их очистки**

Процесс шлакования поверхностей нагрева представляет сложное явление, которое зависит от технических характеристик сжигаемого топлива, температуры нагретого воздуха и его избытка, интенсивности переноса тепла в топке, степени экранирования стен топочной камеры и холодной воронки, геометрических характеристик теплообменных поверхностей, наклона скатов топки и другое [39, (с. 27)].

Шлакованию поверхностей в топочном пространстве способствует удар факела под большим углом атаки. Содержащиеся в горячем газе факела жидкие частицы достигают стен с пониженной температурой, ударяются и оседают на них, что приводит к шлакованию поверхностей топки [40]. Ввиду пониженной температуры, наиболее сильно шлакованию подвержена область холодной воронки. Отсутствие экранирования стен на отдельных участках топочной камеры может привести к возникновению очагов шлакования, что приводит к загрязнению всей поверхности топочной камеры котла.

Температура продуктов сгорания, необходимая для затвердевания уносимых потоком жидких частиц золы для различных топлив, составляет порядка  $1000 \div 1150^\circ\text{C}$  на выходе из топки. Не успевшие затвердеть до выхода из топки частицы золы в жидком или размягченном виде оседают на полурadiационных и конвективных поверхностях нагрева, прилипают к ним, что приводит к образованию гребней отложений [28, (с. 211 – 230)].

Условия и интенсивность шлакования могут сильно изменяться при переводе котла на другие виды топлива, отличные по элементному составу и теплотехническим характеристикам от проектного [36, (с. 350)]. Частые пуски и глубокие разгрузки котла на очистку от отложений приводят к быстрому изнашиванию поверхностей нагрева, снижают надежность оборудования, повышают объем ремонтных и восстановительных работ, снижают рабочий ресурс котла. Регулярная очистка поверхности нагрева воздухоподогревателя способствует интенсификации конвективного теплообмена, позволяя лучше нагреть воздух подаваемый в топку, что в свою очередь способствует интенсификации теплообмена в топочном пространстве, лучшему сжиганию топлива, уменьшению потерь теплоты с уходящими газами и повышению КПД котла.

К основным способам очистки поверхностей нагрева современных котельных агрегатов от шлакозольных отложений относятся: парогазовая обдувка, механическая очистка, водяная обмывка, химическая обмывка, углекислотная очистка, применение техники ударной волны, дробевая очистка, вибрационная и звуковая очистки [41, 42]. Преимущества и недостатки есть у любого метода очистки. Согласно исследованиям, отечественных и зарубежных ученых единственной, оптимальной технологии для очистки поверхностей нагрева всех котельных агрегатов от различного рода отложений не существует [43, 44]. При выборе технологии очистки решающую роль играют комбинации различных факторов: тип котельного агрегата, производительность, род топлива и его качественный состав, величина и состав образующихся отложений, экономичность планируемого способа очистки, наличие специального оборудования и квалифицированного персонала, климатические условия и многие другие [38, (с. 118)].

**Объектом исследования в диссертационной работе** является конвективный трубный пучок воздухоподогревателя котла с учетом изменения проходных сечений при различной степени загрязненности трубок отложениями из дымовых газов. Для удаления отложений с поверхностей нагрева исследуемого воздухоподогревателя предусмотрена механическая очистка с помощью специальных щеток, скребков, штанг и пик, которая наиболее экономична из вышеперечисленных, но имеет ряд недостатков [41, (с. 151)].

В случае необходимости внутренней очистки поверхностей нагрева ВЗП от отложений (на это может указывать увеличение температуры уходящих дымовых газов за агрегатом, уменьшение температуры нагретого воздуха на входе в котел, падение КПД котла и др.) требуется останавливать котельный агрегат и затрачивать время на «остывание» опускного газохода, так как степень загрязнения труб ВЗП определяют при их визуальном осмотре, просвечиванием или пробивкой штангой [45]. Тем самым уменьшается годовой коэффициент рабочего времени (фактическое число часов работы котла, отнесенное к 8760 часам в году), увеличивается простой котельного агрегата в течение эксплуатационного периода. Кроме того, при использовании механических приспособлений с острыми режущими краями возможно повреждение стенок труб, истончение металла поверхности, образование трещин и расколов. Поэтому, в настоящее время все чаще при эксплуатации энергетических установок одновременно применяются сразу несколько способов очистки от отложений. Рассмотрим подробнее возможность выбора дополнительного способа очистки поверхности ВЗП от отложений дымовых газов при работе котла на непроектном угле разреза Каражыра.

Для воздухоподогревателей котлов, работающих на твердом топливе с низким содержанием серы (в угле Каражыра содержание серы 0,26% от общего состава топлива) допускается обмывка водой с температурой  $60 \div 70$  °С и при давлении  $0,3 \div 0,4$  МПа. С экономической точки зрения данный способ очистки от отложений является приемлемым ввиду наличия дешевых водных ресурсов и низких затрат на их предварительную подготовку. В качестве обдувочного

агента можно использовать воду, подогреваемую в конвективной части котла. Скопления золы перед обмывкой должны быть удалены. К отрицательным сторонам такого способа очистки относится риск повреждения и истончения металла поверхностей нагрева при воздействии на него высоким давлением струи, опасность структурных повреждений труб от теплового удара. В низкотемпературной зоне происходит интенсификация процессов коррозии поверхности нагрева ВЗП, поэтому количество водяных обмывок должно быть минимальным, что делает невозможным использование этого метода в качестве регулярной очистки от отложений трубчатых воздухоподогревателей [46, 47].

Химическая обмывка поверхностей нагрева воздухоподогревателя котельного агрегата нецелесообразна с экономической точки зрения ввиду высокой стоимости химических реагентов и отсутствия аппаратов их нанесения [41, (с. 151)]. Среди других методов очистки котельных агрегатов стоимость химической очистки наивысшая. Кроме того, как и в случае с водяной обмывкой, регулярная очистка ВЗП данным способом невозможна [46, 47] так как частое взаимодействие химических реагентов с поверхностью теплообменника приводит к короблению, хрупкости и разрушению металла.

Метод углекислотной очистки или криобластинг [48] не нашел широкого распространения в странах СНГ [41, (с. 151)]. Принцип действия данного способа очистки заключается в подаче под большим давлением и со скоростью примерно 300 м/с маленьких цилиндрических гранул сухого льда ( $\text{CO}_2$ ) в слой отложений, которые мгновенно изменяют их агрегатное состояние из твердого в газообразное. В результате отложения быстро отслаиваются и разрушаются, а металлические поверхности не повреждаются. Гранулы сухого льда имеют короткий срок хранения (48 часов), что требует их производства на месте использования. Углекислотный метод в качестве регулярной очистки ВЗП от отложений не подходит к исследуемому котельному агрегату ввиду отсутствия специализированного оборудования для его осуществления и высокой стоимости его приобретения [48, 49].

В Российской Федерации для очистки поверхностей нагрева котельных агрегатов распространена техника применения ударной волны [50, 51, 52]. С помощью генератора ударных волн (выстрел дозированным зарядом пороха) создается волна, которая «стряхивает» отложения с очищаемых поверхностей. Для применения техники ударной волны на исследуемом котельном агрегате потребуется приобретение дорогостоящих генераторов ударных волн [41, (с. 151)], что также отрицательно скажется на экономике предприятия [53].

Дробевой метод очистки конвективных трубчатых поверхностей нагрева котельного агрегата от отложений затратен как по времени, так и по ресурсам, применяется в крайних случаях, когда загрязнения создают угрозу остановки котлоагрегата [41, (с. 151)]. При дробевом методе очистки в верхнюю часть газохода подается металлическая дробь, которая соударяясь с отложениями разрушает осевший слой и падает в нижний бункер. Затем дробь собирается, очищается и вновь подается в верхний газоход. Размер дроби порядка  $3 \div 7$  мм. Использование данного способа очистки сопровождается высоким риском повреждения металла очищаемых поверхностей при пропуске дроби.

Особенно сильно страдает принимающая поверхность, в которую падает дробь, поэтому должны быть предусмотрены дополнительные металлические слои для ее защиты. Потребуется установка громоздких устройств механического подъема дроби над конвективной шахтой и сбора дроби после ее использования [43].

Вибрационный метод очистки котельных агрегатов впервые был применен в Советском Союзе [54]. Сущность данной методики очистки заключается в том, что в результате вынужденных колебаний очищаемых труб в слое отложений возникают силы инерции, которые при превышении сил сцепления золы частиц между собой и с поверхностью труб приводят к разрушению отложений. Вибрационный метод позволяет полностью автоматизировать процесс очистки котельного агрегата от отложений, обеспечивает возможность неограниченной частоты включения. Однако, вибрационные очистительные устройства могут быть установлены лишь при замене котлоагрегата или при его капитальном ремонте. Применение данного способа очистки сопровождается многократными знакопеременными нагрузками, которые способствуют усталостным напряжениям металла. Однако, ввиду конструктивных особенностей ВЗП (частого расположения труб в теплообменнике с небольшими расстояниями между ними, вваренными концами труб в трубные доски), вибрационный способ для регулярной очистки поверхностей нагрева воздухоподогревателей практически не используется [55].

Парогазовая обдувка является одним из наиболее распространенных методов очистки поверхностей нагрева современных котельных агрегатов [41, (с. 152)]. Основные факторы действующие на процесс обдувки динамический, термический и абразивный. При столкновении с отложениями кинетическая энергия струи обдувочного агента преобразуется в потенциальную энергию деформации слоя отложений. При попадании струи обдувочного агента на слой отложений, имеющий отличную от струи температуру, возникают термические напряжения в слое, приводящие к его разрушению [56]. При сжигании твердых топлив в потоке газов находится значительное количество золы. В процессе обдувки струя обдувочного агента увлекает за собой поток дымовых газов, с содержащимися в нем взвешенными золовыми частицами, которые истирают периферийную часть слоя отложений. Применение парогазовой обдувки удовлетворяют в полной мере требованиям простоты устройства, надежности и удобства в эксплуатации. Стоит отметить, что с ростом единичной мощности котла возрастает количество пара, отбираемого на нужды паровой обдувки, что приводит к увеличению затрат на подготовку добавочной воды, необходимой для восполнения потерь конденсата [57, 58].

В водогрейных котлах целесообразно применение воздушной обдувки, в связи с отсутствием пара. При использовании воздуха проще обеспечить отсутствие в обдувочной струе конденсата. Это позволяет повысить надежность работы обдувочного оборудования и безопасность процесса очистки поверхностей нагрева. Использование воздушной обдувки в качестве регулярной очистки от отложений в ВЗП исследуемого котла оправдано с

экономической точки зрения ввиду доступности обдувочного агента, в качестве которого используется воздух и минимальных затрат на его предварительную подготовку. Для проведения такого способа очистки потребуется установка дополнительного насоса или небольшой реконструкции имеющегося оборудования. Таким образом, рассмотрев современные способы очистки от отложений наиболее подходящим дополнительным методом очистки ВЗП при работе котла на непроектном угле разреза Каражыра является газовая обдувка.

### **1.3 Анализ специализированного программного обеспечения**

Исследование процессов теплообмена в элементах котельных агрегатов связано с необходимостью повышения КПД установок, улучшения экологической обстановки на прилегающих к ним территориях [4, 59].

В период эксплуатации котельного агрегата теплообменные поверхности подвержены воздействию высоких температур продуктов сгорания топлива, в результате чего отсутствует возможность внутреннего обследования состояния поверхностей нагрева. Проведение натуральных экспериментов для процессов, имеющих место в котле, осложняется и большими затратами на их проведение, и сложными процессами в результате передачи теплоты последовательно по всем поверхностям теплообмена. Поэтому, в последнее время, все более актуальным становится изучение процессов теплообмена с использованием компьютерного моделирования [60, 61].

Моделирование теплообменных процессов позволяет получить объяснение природы сложных физических явлений, предсказать их развитие с течением времени, а также не только воссоздать и изучить рассматриваемый процесс, но и, в конечном счете, выбрать наиболее оптимальный режим работы установки [62].

Помимо экспериментальных исследований [63], проводимых для получения достоверной информации об исследуемом объекте, развитие и распространение современной вычислительной техники позволяет значительно ускорить и упростить исследование процессов, протекающих в котлах [5, (с. 964)]. Специализированное программное обеспечение и программные комплексы дают возможность моделировать процессы, учитывающие множество факторов, что позволяет получить достоверные результаты расчета при наименьших материальных затратах, не создавая дорогостоящих физических моделей на основе опытных данных. Это обеспечивает безопасность при исследовании, сокращает время и снижает его трудоемкость [64, 65, 66].

В настоящее время моделирование процессов теплообмена с помощью электронно-вычислительных машин является одним из главных способов получения сведений о аэродинамике теплоносителей, локальном теплообмене, общей картины процессов тепло и массопереноса. Главной задачей является построение адекватной модели исследуемого объекта [67].

При построении модели объекта необходимо идеализировать некоторые параметры, к примеру, такие как, внешнее воздействие, свойства конструкции и

др. [68, 69]. Поверхность конструкции исследуемого объекта в действительности несовершенна, может быть неоднородной, иметь дефекты и особенности в характере внешнего нагружения и т.д. При проведении вычислений нельзя учесть абсолютно все особенности исследуемого объекта, поэтому при моделировании процессов теплообмена необходимо принимать дополнительные упрощения [70, 71]. На рисунке 5 схематично представлено создание эффективной модели исследуемого объекта [8, (с. 247)].



Рисунок 5 – Создание эффективной модели исследуемого объекта [68]

При построении модели можно выделить несколько основных этапов [72, (с. 110)]:

1) Изучение моделируемого объекта и формулировка технического задания на разработку модели. Формирование модели начинается с описания объекта или явления. Данный этап можно назвать формулировкой предмодели.

2) Концептуальная и математическая постановка задачи. На данном этапе формулируются основные вопросы, выдвигаются гипотезы касательно свойств и поведения объекта моделирования. В конечном счете создается математическое описание выдвинутых гипотез для количественного анализа их выполнения. Для каждого выделенного элемента и явления записывается уравнение, отражающее его функционирование [72, (с. 110)].

3) Следующим шагом является качественный анализ и проверка корректности модели. Данный этап подразумевает определение отклонения результатов вычислений от фактических данных и требует контроля:

- размерностей;
- характера зависимостей;
- граничных условий;
- физического смысла;
- экстремальных ситуаций.

Для обеспечения корректности модели должны быть выполнены все контрольные проверки.

4) Практическое использование модели. На завершающем этапе сформированный анализ позволяет: определить правильность выдвинутых гипотез; выявить возможности изменения исследуемого объекта, с целью повышения эффективности его работы; провести оценку возможности введения дополнительных упрощений без вреда качеству расчета; описать области применения разработанной модели; выбрать дальнейший путь совершенствования расчетной модели [72, (с. 110)].

Для проведения исследований и анализа газодинамики и теплофизических процессов в энергетических установках в настоящее время активно применяются разработанные пакеты прикладных программ Ansys Fluent, Comsol, Star-CD, Flow3D, Open-FOAM, FlowVision, SigmaFlow, Fire 3D и т.п., которые работают для различных условий моделирования с использованием сеточных методов с улучшенной сходимостью [73, 74].

Востребованными остаются исследования, посвященные численному моделированию процесса теплообмена в топочных устройствах и создания математической модели процесса горения [75]. Такие исследования позволяют получить достоверную информацию о фактических процессах, протекающих в топке. Полученные знания крайне важны при:

- разработке и создании новых типов котельных агрегатов;
- проведении качественной оценки вариаций технических проектов котлов;
- формировании предложений при переводе агрегата на другой вид топлива или его смеси;
- конкретизации режимных параметров, регламентирующих работу котельного оборудования, при минимальном или полном отсутствии натуральных экспериментов;
- имитации различных аварийных ситуаций;
- получении достоверных данных по локальному теплообмену в участках, труднодоступных для проведения измерений;
- совершенствовании горелок (низкоэмиссионные горелки);
- проектировании и применении ступенчатого сжигания топлива, направленного на уменьшение выбросов оксидов азота;
- проектировании и применении технологии впрыске реагентов с целью снижения выбросов оксидов серы;
- применении технологии рециркуляции дымовых газов;
- изучении применения технологии стадийной подачи воздуха;

- исследования эмиссии оксидов азота и серы в процессе сжигания топлива;
- определения очагов прогрессивного шлакования и наиболее подходящих мест для установления очистного оборудования;
- повышения точности результатов компьютерного расчета [75, (с. 59)].

Модернизации котельных агрегатов с целью повышения их эффективности, в основном, связана с усовершенствованием системы подачи окислителя и топлива в топку котла [76].

Применение специализированного пакета прикладных программ FIRE 3D позволило авторам работы [77] провести исследование теплообменных процессов сжигания Экибастузского каменного угля в топке котельного агрегата ПК-39 и бурого березовского угля в топочном пространстве котла БКЗ-210-140.

Математическая модель, разработанная авторами работы [78], направлена на решения ряда задач, таких как установление влияния элементарного состава угольной смеси на энергетическую эффективность котельных агрегатов, что дает возможность определения оптимального состава смеси топлив для конкретных теплоисточников. Авторами [74] с помощью пакета Delphi разработана математическая модель, содержащая блоки расчета температурных напряжений котлов. На основании полученных результатов представлены примеры графика роста температуры.

Решение современных вопросов теплофизики и теплоэнергетики с помощью моделирования рассмотрено авторами [79]. Работа посвящена изучению эмиссии вредных выбросов при сжигании низкосортного угля в камере сгорания котельного агрегата БКЗ-75. Полученные результаты позволили сформировать большую базу данных теплофизических характеристик сжигаемого топлива.

В работах [80 – 84] рассмотрено применение технологии 3D моделирования при исследовании процессов тепломассопереноса в камерах сгорания действующих энергетических объектов. Работы [85 – 88] посвящены исследованию процессов теплообмена в топочной камере котельных агрегатов.

Одной из наиболее распространенных прикладных программ компьютерного моделирования и исследования теплофизических процессов является Ansys Fluent. Программа обладает доступным графическим интерфейсом (graphical user interface – GUI), обеспечивающим диалоговый доступ к программным функциям, командам, документации, и ссылкам. Система меню позволяет пользователю легко ориентироваться в программе [89].

Программное обеспечение можно использовать в различных инженерных дисциплинах, таких как теплофизика, термодинамика, гидродинамика, электромагнетизм, структурный анализ, микроэлектроника и т.п. [90, 91]. Данный комплекс направлен на решение задач имитационного моделирования исследуемого объекта, при этом требуется подробно описать его геометрию, физику исследуемых процессов, свойства используемых материалов, эксплуатационные характеристики и другие необходимые исходные данные.



Математическое моделирование требуемых процессов в комплексе Ansys Fluent проводится методом конечных элементов (МКЭ), при котором исследуемый объект разбивается на множество простых конечных элементов (рисунок 6). В результате, создается сетка из границ конечных элементов [92].

Различают несколько типичных форм конечных элементов, в которых поле смещений определяется по смещениям узлов с помощью некоторых интерполяционных функций [92, (с. 11)].

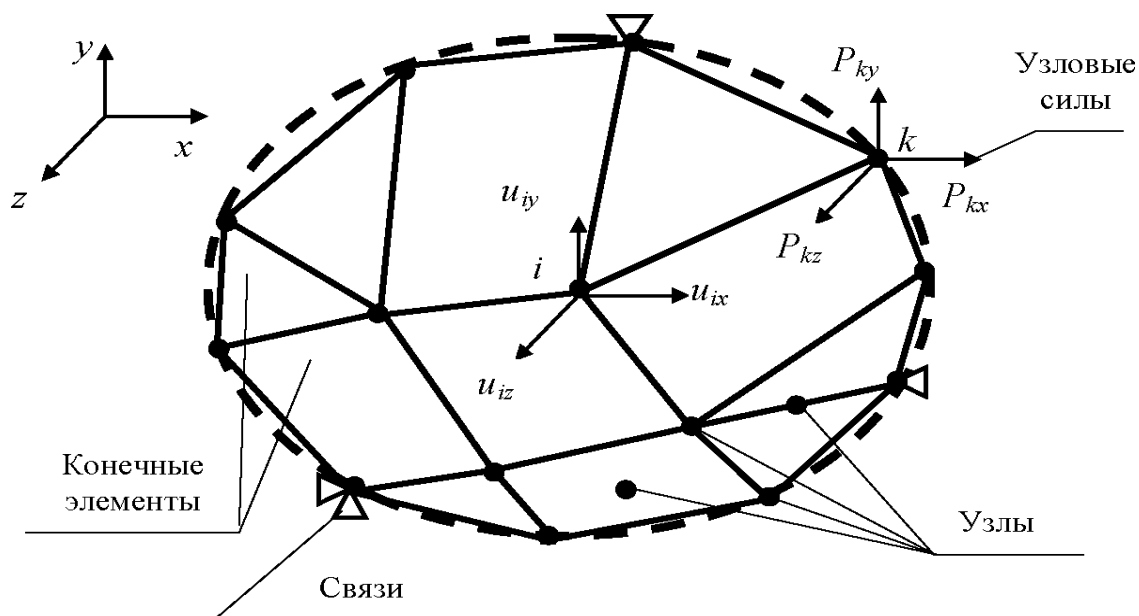


Рисунок 6 – Конечные элементы [92]

Решение задач с помощью метода конечных элементов сопровождается [93, (с. 21)]:

- I) постановка задачи, обозначение названия, построение предварительного чертежа исследуемого объекта;
- II) определение геометрических параметров модели, подходящих для выполнения расчета методом конечных элементов;
- III) создание сетки из границ конечных элементов;
- IV) определение и применение граничных условий;
- V) проведение вычислений;
- VI) разбор полученных результатов.

На этапе I проведения моделирования в среде Ansys Fluent для перехода от исследуемого физического явления к его компьютерной модели необходимо определить [93, (с. 21)]:

- 1) конечную цель исследования (что нужно найти – распределение скоростей, давлений, среднюю температуру на выходе из теплообменника и т.п.);
- 2) конкретизировать:

– применяемые физические модели (ламинарный или турбулентный режим движения жидкостей, радиационный, конвективный теплообмен или др.);

– определить допущения, ввиду отсутствия возможности точь-в-точь моделирования фактической ситуации (упростить геометрию, принять равномерность протекания процесса);

– допустимые упрощения, использование которых не уменьшит точность расчета (определить каким можно построить исследуемый объект, трехмерный или двухмерный, задать симметричность осей и т.д.);

3) степень точности вычислений;

4) длительность расчета.

Третий и четвертый пункты данного этапа взаимосвязаны: для получения более точного результата потребуются создание мелкой сетки исследуемого объекта, что увеличивает расчетный (итерационный) процесс, тем самым увеличивая продолжительность исследования [93, (с. 21)].

На II этапе определения геометрии компьютерной модели необходимо:

1) выделить расчетную область, в пределах которой будет полностью происходить исследуемое явление, исключив области, в которых явления оказывают незначительное влияние на рассматриваемый процесс;

2) определить граничные условия для границ расчетной области (найти физические данные);

3) определить мерность задачи (2D, осесимметричная, 3D) [93, (с. 21)].

На этапе III строится сетка исследуемой области и нужно определить:

1) форму ячеек в зависимости от уровня сложности исследуемого объекта, выбрать четырехугольную / гексаэдральную (quad / hex), треугольную / тетраэдральную (tri / tet) или гибридную (hybrid);

2) размерность сетки для каждой конкретной области:

– выделить наиболее важные участки, где сетка должна быть мельче, для более точного расчета;

– прогнозирование участков с большой разницей значений;

– применение адаптированного измельчения сетки.

3) потребность вычислительной мощности компьютера:

– численность ячеек расчетной области;

– возможность применения стандартных моделей, заложенных в программе или разработки новых [93, (с. 21)].

Завершив вышеназванные этапы можно приступать непосредственно к численному исследованию рассматриваемого процесса.

Для моделирования и изучения процессов методом КЭ требуется установление материала и свойств элементов. При рассмотрении стационарной теплопроводности требуется задать коэффициент теплопроводности. При рассмотрении нестационарной теплопроводности требуется дополнительно определить плотность и теплоемкость материала. При рассмотрении нелинейной задачи теплопроводности указанные физические свойства необходимо определять, как функции температуры. Правильное разбиение

расчетной области на элементарные ячейки имеет определяющее значение для точности расчета и правдоподобности получаемых данных [90, (с. 63)].

В работе [73] представлены результаты моделирования процессов сжигания в Т-образной топочной камере котельного агрегата топлива в пылевидном состоянии, получены данные по шлакованию поверхностей нагрева топки. Моделирование выполнено в программном комплексе Ansys Fluent, установлена детальная информация о распределении тепловых полей и полей концентраций в газовой и дисперсной фазах.

Авторами [66] с помощью CFD-пакета (Computational Fluid Dynamics - вычислительная гидрогазодинамика) Ansys изучен процесс тепло-массообмена с сложным распределением подачи топливных струй (тангенциальная подача через верхние и нижние горелки) в топочное пространство. Получено полное описание характеристик теплофизических процессов. Моделирование показало, что усовершенствование конструкции вихревой топки позволило оптимизировать работу агрегата.

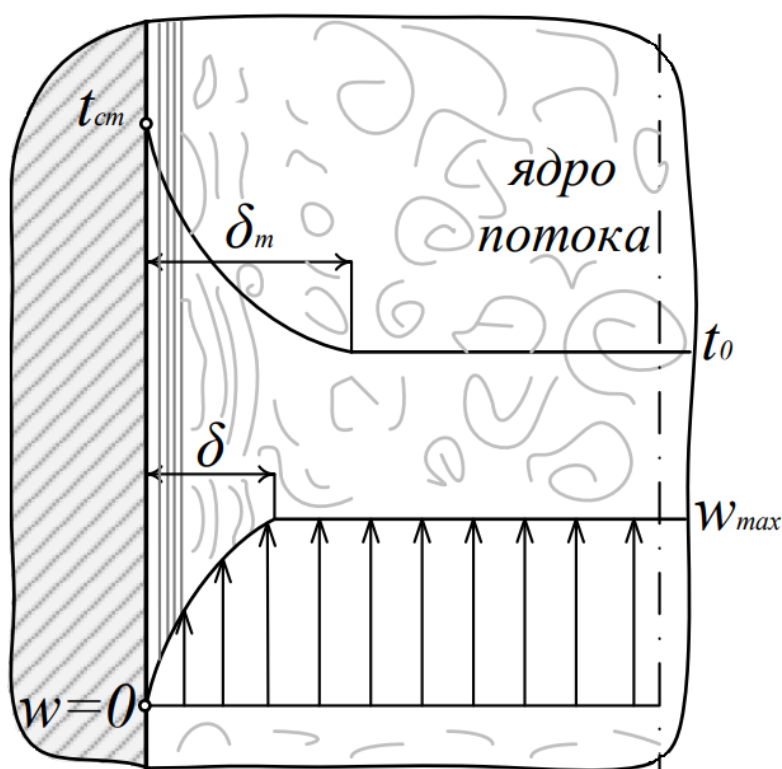
Проведение экспериментальных исследований непосредственно в котельных агрегатах усложняется экстремальными условиями их работы, сложностью их формы и большими габаритами, кроме того осуществление натуральных экспериментов влечет большие финансовые затраты. Разработка компьютерных моделей теплофизических процессов, протекающих в элементах энергетических котлов, позволяет с требуемой точностью определить реальные теплофизические характеристики обследуемых объектов. Для изучения процессов теплообмена в энергетических установка хорошо зарекомендовал себя комплекс МКЭ Ansys Fluent, который предоставляет широкий спектр возможностей расчета, начиная с простых, линейных, статических процессов, и заканчивая сложными, нелинейными, переходными динамическими процессами. Проведенный анализ имеющихся данных подобных исследований показал, что наиболее часто рассматривается моделирование теплообменных процессов в топочной камере котла [80 ÷ 88]. Экспериментальное исследование и моделирование процессов теплообмена хвостовых поверхностей, к которым относится воздухоподогреватель, при различной степени загрязнения золой рассмотрено в меньшей степени, что делает актуальным настоящее диссертационное исследование.

#### **1.4 Особенности конвективного переноса теплоты**

В воздухоподогревателе перенос тепла происходит за счёт конвекции и теплопроводности. В зависимости от природы возникновения движения теплоносителя различают естественную и вынужденную конвекцию. Движение, возникающее за счет разности плотностей более нагретых и менее нагретых частиц теплоносителя, считается естественным. Движение, возникающее за счет разности давлений, создаваемой насосом или вентилятором, считается вынужденным [94, (с. 400)]. В воздухоподогревателе котельного агрегата движение дымовых газов и нагреваемого воздуха обеспечивается работой дымовых насосов и дутьевых вентиляторов.

Перенос теплоты характеризуется рядом особенностей, связанных с гидродинамикой движения жидкости вблизи поверхности трубы [95]. Режим движения теплоносителя оказывает огромное влияние на передачу тепла. Соответствующее ламинарному движению спокойное движение частиц предотвращает перемешивание слоев жидкости, теплота от стенки к теплоносителю передается теплопроводностью [94, (с. 400)].

Теплота при турбулентном движении жидкости передается совместно теплопроводностью и конвекцией. Турбулентному движению свойственно постоянное перемешивание слоев теплоносителя в ядре потока, в результате этого температура жидкости в этой зоне выравнивается по сечению потока (рисунок 7). Вблизи поверхности стенки имеет место образование ламинарного подслоя жидкости [94, (с. 400)].



$\delta$  – толщина гидродинамического пограничного слоя,  $\delta_m$  – толщина теплового пограничного слоя,  $w$  – скорость потока.

Рисунок 7 – Распределение температур теплоносителя в различных его зонах [94]

В области ламинарного подслоя в результате действия сил вязкого трения движение теплоносителя затормаживается, скорость потока изменяется от нулевого значения на поверхности стенки до скорости невозмущенного потока (на некотором расстоянии от стенки). Эта область называется гидродинамическим пограничным слоем ( $\delta$  – толщина слоя). По мере удаления от стенки происходит снижение устойчивости гидродинамического пограничного слоя и на определенном расстоянии ламинарный режим

движения потока сменяется турбулентным. Интенсивность и коэффициент теплоотдачи увеличиваются при уменьшении толщины гидродинамического пограничного слоя [94, (с. 400)]. Гидродинамика движения жидкости определяется числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad (7)$$

где  $D$  – наружный диаметр трубы, м.

Область вблизи твердой стенки, в пределах которой температура теплоносителя изменяется от температуры стенки до температуры потока вдали от поверхности называют тепловым пограничным слоем ( $\delta_m$  – толщина слоя). Теплота в этой области передается практически только за счет теплопроводности. Общая интенсивность передачи тепла определяется и лимитируется переносом теплоты в тепловом пограничном слое. Для газов толщина гидродинамического и теплового пограничных слоев практически одинакова [95, (с. 65)].

Гидродинамический и тепловой пограничные слои играют немаловажную роль в процессе передачи теплоты. Соотношение толщины теплового и гидродинамического пограничных слоев определяется значением числа Прандтля [95, (с. 65)]:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (8)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с;

$a$  – коэффициент температуропроводности теплоносителя, м<sup>2</sup>/с.

Помимо природы возникновения и режима движения жидкости, толщины гидродинамического и теплового пограничных слоев на коэффициент теплоотдачи оказывают влияние теплофизические свойства теплоносителя, геометрические размеры, форма и ориентация теплообменной поверхности [95, (с. 64)].

Коэффициент теплоотдачи зависит от таких свойств теплоносителя как коэффициент теплопроводности, теплоемкость, кинематическая вязкость, плотность, коэффициент объемного расширения. Известно, что коэффициент теплоотдачи зависит от геометрической формы поверхности тела (плоская поверхность, цилиндрическая, шаровая, стержень или иная), размеров (протяженности поверхности, диаметра трубы или сферы), ориентации поверхности теплообмена (вертикальной, горизонтальной с теплоотдачей вверх, горизонтальной с теплоотдачей вниз, наклонной и другой). Влияние большого числа факторов на коэффициент теплоотдачи усложняет исследование процесса конвективного теплообмена [95, (с. 65)].

Для решения задач конвективного теплообмена используют критериальные зависимости, полученные на основе теории подобия и экспериментальных данных [1, 2].

Уравнение подобия для процесса конвективного теплообмена имеет вид [95, (с. 65)]:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (9)$$

где  $Nu, Re, Pr$  – соответственно числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля.

Критерий Нуссельта определяется как:

$$Nu_l = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (10)$$

где  $l$  – характерный размер, м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Из соотношения (10) коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) определяется как [95, (с. 65)]:

$$\alpha = \frac{Nu_l \times \lambda}{l} \quad (11)$$

При конвективном теплообмене общий коэффициент теплоотдачи  $\alpha_\Sigma$  приближенно вычисляется как сумма коэффициентов теплоотдачи для лучистого  $\alpha_l$  и конвективного  $\alpha_k$  теплообмена:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_l + \alpha_k \quad (12)$$

В технологических процессах в условиях вынужденной конвекции газового теплоносителя лучистый теплообмен начинает играть существенную роль по сравнению с конвективным при температуре излучающей нагретой поверхности выше 800 К [94]. В конвективных поверхностях нагрева воздухоподогревателя котельного агрегата температура продуктов сгорания на входе в теплообменник не превышает 700 К, таким образом формула 9 упрощается до вида:

$$\alpha_\Sigma = \alpha_k \quad (13)$$

На практике особый интерес представляет процесс переноса теплоты при вынужденном поперечном обтекании теплоносителя одиночной трубы (рисунок 8) и пучков труб (рисунок 10) [95, (с. 78)].

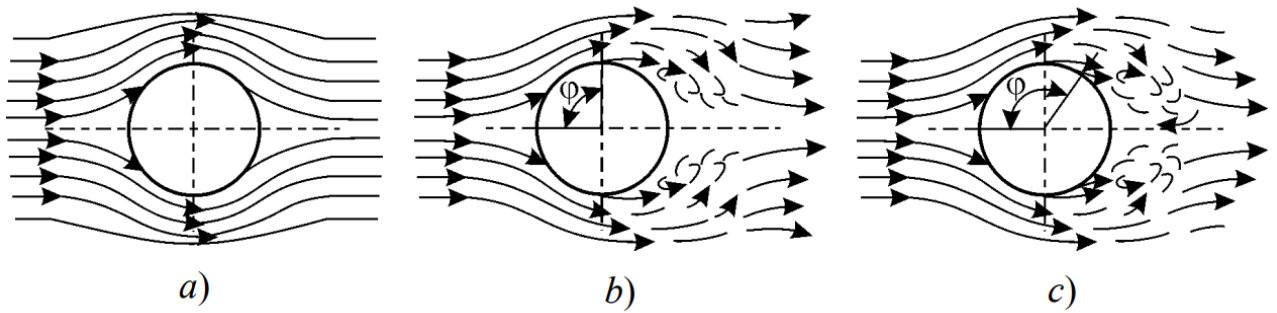


Рисунок 8 – Поперечное омывание трубы при различных режимах движения жидкости [95, с. 78].

Ламинарное движение теплоносителя при поперечном обтекании одиночной трубы представлено на рисунке 8 (а). Скорости движения потока небольшие, число Рейнольдса менее 40. Наблюдается плавное обтекание трубы потоком.

При переходном режиме движения жидкости на рисунке 8 (b), число Рейнольдса находится в пределах  $40 \div 100$ , скорость потока возрастает, что приводит к отрыву ламинарного пограничного слоя от поверхности трубы. Угол отрыва находится в пределах  $\varphi = (80 \div 90)^\circ$ .

При развитом турбулентном режиме движения жидкости (рисунок 8 c), число Рейнольдса более  $10^5$ , ламинарное движение в пограничном слое сменяется турбулентным. Угол отрыва находится в пределах  $\varphi = (120 \div 140)^\circ$ . Наименьшая толщина пограничного слоя находится в лобовой точке, далее слой утолщается до тех пор, пока поток не отрывается [95, (с. 79)].

Характер изменения коэффициента теплоотдачи в зависимости от режима движения при поперечном обтекании теплоносителя одиночной трубы представлен на рисунке 9 [95, (с. 79)].

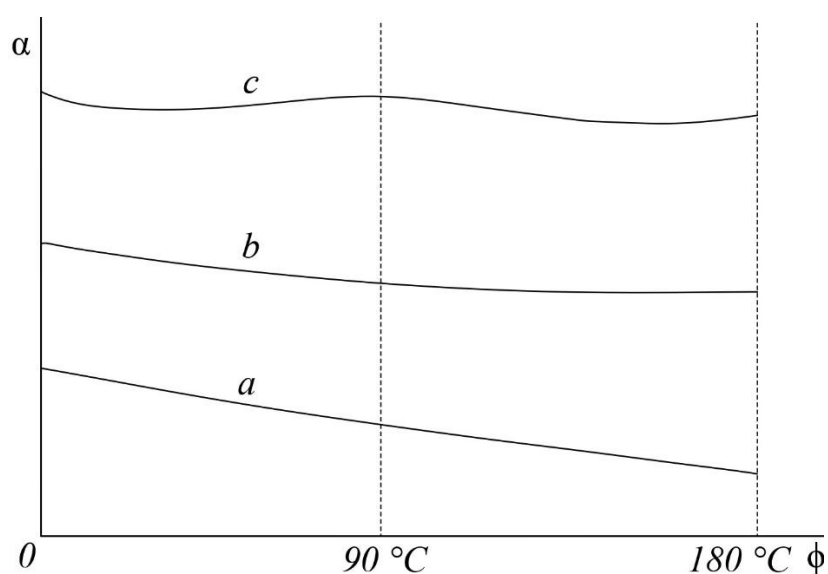


Рисунок 9 – Характер изменения коэффициента теплоотдачи от режима движения жидкости [95, (с. 79)].

Линии (a) на рисунке 9 соответствует плавное постоянное уменьшение коэффициента теплоотдачи от максимального значения в лобовой точке, при соответствующем ей минимальном пограничном слое до минимального значения в точке отрыва потока. Режим движения ламинарный.

Линии (b) рисунка 9 соответствует переходный режим движения жидкости, при котором коэффициент теплоотдачи выше в сравнении с линией (a). Появление вихреобразных движений способствует неравномерному изменению коэффициента теплоотдачи.

Линия (c) рисунка 9 характеризует изменение коэффициента теплоотдачи при развитом турбулентном режиме движения жидкости.

Увеличение коэффициента теплоотдачи в пределах  $0 \div 90^\circ$  объясняется сменой режима движения в пограничном слое, в пределах  $90 \div 180^\circ$  отрывом развитого турбулентного пограничного слоя. Коэффициент теплоотдачи при развитом турбулентном режиме (c) выше чем при ламинарном и переходном режимах (a, b) [95, (с. 79)].

Современные рекуперативные воздухоподогреватели выполняют в виде пучка труб, расположенных в шахматном порядке. Картина движения теплоносителя в теплообменном пучке представлена на рисунке 10 [2, (с. 105)].

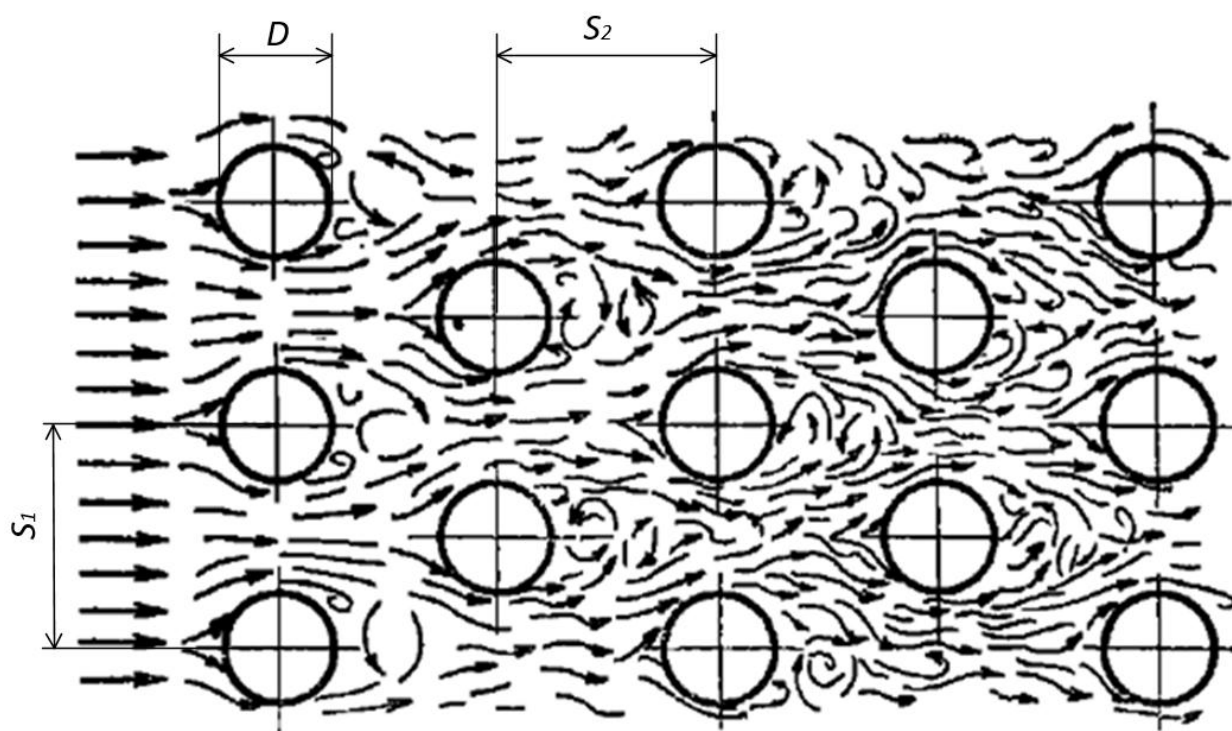


Рисунок 10 – Картина движения теплоносителя в теплообменном пучке [2]

Характеристиками пучка являются внешний диаметр труб  $D$  и расстояния между осями труб по ширине  $S_1$  и глубине  $S_2$  пучка. Характер обтекания теплоносителем трубок, расположенных в глубине шахматного пучка мало чем отличается от обтекания трубок первого ряда. Максимальная теплоотдача для



всех рядов приходится на лобовую точку. Изменение условий обтекания трубок приводит к изменению теплоотдачи [2, (с. 105)].

Теплоотдача первого ряда отличается от остальных рядов и определяется начальной турбулентностью потока. Для последующих рядов теплоотдача постепенно увеличивается. Причиной этому служит увеличение турбулентности потока при прохождении его через пучок. Начиная с третьего ряда, турбулентность потока принимает стабильный характер [2, (с. 81)]

При моделировании процессов конвективного теплообмена в ВЗП, для нахождения коэффициентов теплоотдачи результаты эксперимента обрабатываются в числах подобия, а связь между ними представляется в виде уравнений подобия:

$$Nu = C Re_{жd}^n Pr_{ж}^b \quad (14)$$

где  $C$ ,  $n$ ,  $b$  – постоянные коэффициенты, зависящие от свойств теплоносителя и геометрических параметров поверхности теплообмена. Индексы  $d$  и  $ж$  указывают на определяющий размер диаметр  $d$  и определяющую температуру жидкости  $t_{ж}$  [2, (с. 66)].

Определение коэффициентов теплоотдачи позволяет вычислить линейный коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе. Газодинамические условия работы ВЗП при наличии и отсутствии отложений из дымовых газов на поверхности теплообмена характеризуются аэродинамическим сопротивлением теплообменника.

Теоретическое гидравлическое сопротивление теплообменника  $\Delta p$ , Па можно записать в виде [2, 96]:

$$\Delta p = Y Re^{-m} \cdot v^2 \quad (15)$$

Комплексная тепловая характеристика теплообменного аппарата [96, (с. 401)]  $\alpha = f\left(\frac{Q}{N \cdot \Delta t}\right)$  раскрывает зависимость между коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  и энергетическим показателем теплообменного аппарата  $E$ , ( $K^{-1}$ ).

Энергетический показатель  $E$  представляет собой количество теплоты  $Q$ , Дж, передаваемое в теплообменном аппарате за секунду при среднем температурном напоре между теплоносителями 1 К, приходящееся на единицу мощности  $N$ , (Дж/с), затрачиваемой на перемещение теплоносителей [96, (с. 407)]:

$$E = \frac{Q}{N \cdot \Delta t} \quad (16)$$

где  $\Delta t$  – среднелогарифмический температурный напор между теплоносителями, который складывается из температурного напора  $\Delta t_1$  между горячим теплоносителем и поверхностью стенки, разности температур  $\Delta t_{ст}$

горячей и холодной поверхности стенки и температурного напора  $\Delta t_2$  между стенкой и холодным теплоносителем, т.е. [96, (с. 407)]:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_{ct} + \Delta t_2 \quad (17)$$

В аналитической форме комплексные характеристики записываются [96, (с. 407)]:

$$\alpha_r = A/E^u \quad (18)$$

В формуле 18  $A$  и  $u$  – параметры тепловой комплексной характеристики.

$$A = \left[ \frac{F_{\Pi}}{fY} \left( \frac{l}{\nu} \right)^3 \right]^u \cdot C^{(3-m)/(3-n-m)} \quad (19)$$

$$u = n/(3 - n - m) \quad (20)$$

где  $F_{\Pi}$  – площадь полной поверхности теплообмена, омываемой теплоносителем,  $m^2$ ;

$f$  – площадь живого сечения для прохода теплоносителя,  $m^2$ ;

$\nu$  – кинематическая вязкость теплоносителя,  $(m^2/c)$ ;

$C$  и  $n$  – постоянные в уравнении теплоотдачи (10);

$Y$  и  $m$  – постоянные в уравнении гидравлического сопротивления (11);

$\nu$  – скорость теплоносителя,  $m/c$  [96, (с. 407)].

Зависимости конвективных коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_r$  и  $\alpha_b$  от энергетических показателей  $E_r$  и  $E_b$  поверхности теплоотдачи, обтекаемых горячим и холодным теплоносителями соответственно равны [96, (с. 411)]:

$$\alpha_r = A_r/E_r^{u_r} \quad (21)$$

$$\alpha_b = A_b/E_b^{u_b} \quad (22)$$

При этом к стороне поверхности теплообмена, обтекаемой горячим теплоносителем [96, (с. 411)]:

$$A_r = \left[ \frac{F_{\Pi_r}}{f_r Y_r} \left( \frac{l_r}{\nu_r} \right)^3 \right]^{u_r} \cdot C_r^{(3-m_r)/(3-n_r-m_r)} \quad (23)$$

$$u_r = n_r/(3 - n_r - m_r) \quad (24)$$

К стороне поверхности теплообмена, обтекаемой холодным теплоносителем [96, (с. 411)]:

$$A_B = \left[ \frac{F_{ПБ}}{f_B Y_B} \left( \frac{l_B}{v_B} \right)^3 \right]^{u_B} \cdot C_B^{(3-m_B)/(3-n_B-m_B)} \quad (25)$$

$$u_B = n_B / (3 - n_B - m_B) \quad (26)$$

Значения чисел Рейнольдса связаны с энергетическими показателями поверхностей теплообмена следующими уравнениями [96, (с. 411)]:

$$Re_\Gamma = J_\Gamma / E_\Gamma^{1/(3-n_\Gamma-m_\Gamma)} \quad (27)$$

$$Re_B = J_B / E_B^{1/(3-n_B-m_B)} \quad (28)$$

где:

$$J_\Gamma = \left[ \frac{F_{ПГ} C_\Gamma}{f_\Gamma Y_\Gamma} \left( \frac{l_\Gamma}{v_\Gamma} \right)^3 \right]^{1/(3-n_\Gamma-m_\Gamma)} \quad (29)$$

$$J_B = \left[ \frac{F_{ПБ} C_B}{f_B Y_B} \left( \frac{l_B}{v_B} \right)^3 \right]^{1/(3-n_B-m_B)} \quad (30)$$

Энергетический показатель  $E$  в уравнении [96] рассчитывается по теоретической мощности  $N$ , затрачиваемой на перемещение теплоносителей. В действительности затрачиваемая мощность  $N_d$  больше теоретической, так как насосы и вентиляторы, перемещающие продукты сгорания и нагреваемый воздух, имеют КПД меньше 1.

$$N = N_\Gamma + N_B \quad (31)$$

Кроме того, из-за загрязнения поверхности теплообмена в процессе эксплуатации действительное гидравлическое сопротивление  $\Delta p_d$  больше теоретического  $\Delta p$ , в связи с этим [96]:

$$N_d = \xi_\Gamma N_\Gamma + \xi_B N_B \quad (32)$$

где  $\xi = \Delta p_d / \Delta p$  – увеличение мощности, обусловленное загрязнением поверхности теплообмена [96, (с. 412)].

При исследовании конвективного теплообмена в воздухоподогревателе множество влияющих на процесс параметров заменяется всего тремя критериями: определяющим гидродинамическую обстановку в потоке теплоносителя критерием Рейнольдса, учитывающим теплофизические свойства теплоносителя критерием Прандтля и характеризующим соотношение

между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и интенсивностью теплообмена за счет теплопроводности критерием Нуссельта.

### **1.5 Выводы и постановка задач**

Воздухоподогреватель конструктивно представляет геометрически сложную плотную упаковку большого количества теплообменных труб с узкими проходными сечениями. Размещение термомпар и другого измерительного оборудования для детального изучения особенностей теплообмена в такой объемной конструкции сопряжено с большими трудностями. Следует также учесть, что при этом будут существенно уменьшены проходные сечения, что отразится на аэродинамике течения. Проблемой является отсутствие возможности или значительные трудности для прямого экспериментального исследования процесса теплообмена в воздухоподогревателе при непосредственной эксплуатации котельного агрегата вследствие наличия высоких температур в зонах контакта дымовых газов с теплообменными поверхностями и конструктивными элементами пучков теплообменных труб. По этой причине в последние годы во всем мире получают развитие методы теоретического анализа процессов теплообмена, а результаты отдельных экспериментальных исследований используются только для их верификации.

Исходя из актуальности и анализа проблемы в настоящей работе предложено провести комплексные теоретические и отдельные экспериментальные исследования, направленные на повышение эффективности процессов теплообмена в воздухоподогревателе котельного агрегата КВ-Т-116,3-150, как типового оборудования, работающего на углях Республики Казахстан.

**Целью настоящей диссертационной работы** является повышение эффективности работы котельного агрегата на основании установления влияния загрязнения низкотемпературных поверхностей нагрева на интенсивность конвективного теплообмена при сжигании непроектного топлива с помощью экспериментальных исследований и компьютерного моделирования.

С учетом влияния параметров процесса в топке котла на процессы теплообмена в ВЗП необходимо предварительно определить рабочий режим работы топочной камеры, что позволит методически правильно организовать весь цикл исследований.

Таким образом, для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- Построение изотермических поверхностей топки котла.
- Определение степени черноты и термографическое исследование воздухоподогревателя.
- Разработка содержательной постановки задачи моделирования и установление граничных условий процессов теплообмена низкотемпературных хвостовых поверхностей нагрева.

– Установление характера изменения зависимостей температур теплоносителей и интенсивности теплообмена (коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи) от степени загрязнения в низкотемпературных конвективных поверхностях нагрева;

– Установление критерия периодичности очистки воздухоподогревателя и влияния газодинамического характера течения среды на эффективность работы котла при изменении температурно-временного воздействия.

Компьютерное моделирование на современном этапе развития информационных технологий является наиболее распространенным методом изучения процессов теплообмена в теплоэнергетическом оборудовании. Исследование процессов теплообмена в хвостовых поверхностях котлоагрегата с помощью моделирования позволит получить сведения, необходимые для наиболее полного, рационального сжигания топлива при минимальном воздействии на окружающую среду, способствует совершенствованию, повышению производительности и надежности работы котельного агрегата, ресурсосбережению и энергоэффективности.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем разделе приводятся основные технические характеристики исследуемого котельного агрегата и экспериментального оборудования, результаты пирометрического обследования топочного пространства и термографической съемки поверхности опускного газохода, основные положения раздела опубликованы в работах [4, 9, 97 – 101].

### 2.1 Этапы проведения работы

Организация комплексного исследования проводилась по схеме, представленной на рисунке 11.



Рисунок 11 – Организация исследования

Экспериментальные исследования процессов теплообмена в газоходах котла проводилось на действующем агрегате КВ-Т-116,3-150 ТЭЦ-1 города Семей. С учетом хорошей апробации метода конечных элементов Ansys Fluent другими авторами применительно к котельному оборудованию, именно этот метод был выбран для компьютерного моделирования процессов теплообмена в воздухоподогревателе котельного агрегата. Компьютерное моделирование процессов теплообмена проводилось на базе «Лаборатории экспериментальной теплофизики» Института атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов.

## 2.2 Технические характеристики водогрейного котла КВ-Т-116,3-150

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели необходимо изучение топочного пространства и воздухоподогревателя, элементарного состава и технологии сжигания топлива, условий эксплуатации агрегата включая его нагрузку, установление влияния загрязнений на интенсивность конвективного теплообмена в ВЗП.

Водогрейные котлы марки КВ-Т-116,3-150 являются основным видом эксплуатируемых котлов ТЭЦ-1 города Семей [4]. Основные технические характеристики водогрейного котла представлены в таблице 1 [98, (с. 12)], продольный разрез на рисунке 12 [102].

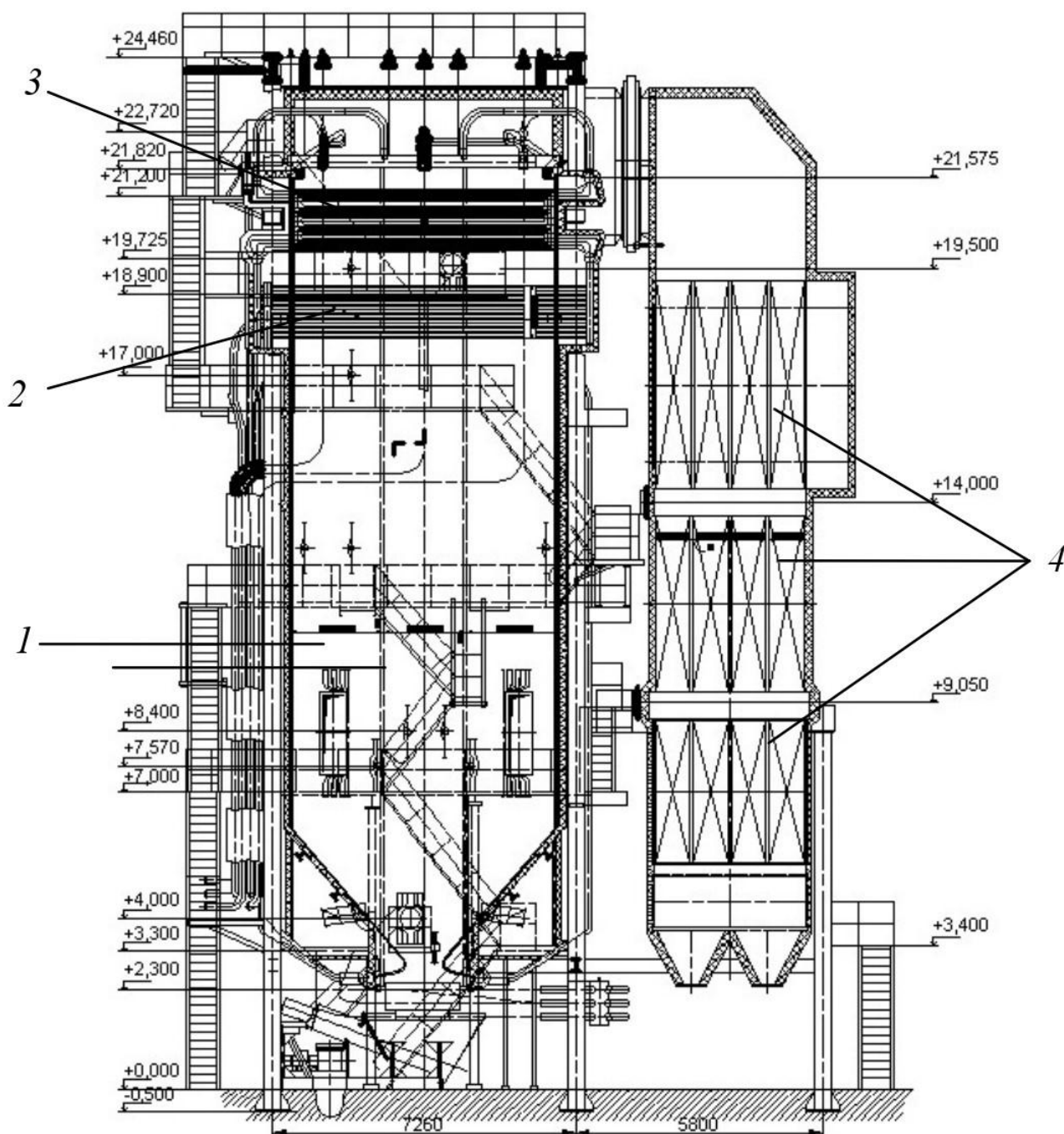
Таблица 1 – Основные технические характеристики котла КВ-Т-116,3-150

Техническая характеристика	Значение
Номинальная теплопроизводительность, МВт (Гкал/ч)	116,3 (100)
Температура воды на входе в котел, °С	70
Номинальная температура воды на выходе из котла, °С	150
Максимальное избыточное давление воды на выходе из котла, МПа	2,45
Минимальное избыточное давление воды на выходе из котла, МПа	1,03
Номинальный расход воды через котёл, т/ч	1240
Гидравлическое сопротивление котла не более, МПа	0,2

Максимальная тепловая производительность котельного агрегата 116,3 МВт (100 Гкал/ч). Для расчета годовой потребности в натуральном топливе для водогрейного котла необходимо использовать часовую тепловую нагрузку, требующуюся на отопление и горячее водоснабжение (но не среднечасовой расход топлива). Поэтому эффективность работы котла в диссертационной работе рассматривается в диапазоне нагрузок, выраженных в специальной единице измерения Гкал/ч.

Топка котла КВ-Т-116,3-150 выполнена в виде вертикальной призмы, на фронтальной и боковых сторонах которой на уровне +8360 мм установлены горелки, на тыльной стороне горелки отсутствуют. Продолжением топки

является короб подъемного газохода, где расположены водогрейные ширмы и змеевики конвективной поверхности нагрева [98, (с. 12)]. Далее продукты сгорания через перепускные газовые коробки поступают в опусной газоход.



*1 - топка, 2 - водогрейные ширмы, 3 - змеевики конвективной поверхности нагрева, 4 - кубы трубчатого воздухоподогревателя*

Рисунок 12 – Продольный разрез котла КВ-Т-116,3-150 [102]

Стены топки и подъемного газохода обшиты теплоизоляционным материалом, в качестве которого служат базальтовые маты, обложенные стеклотканью. Для определения характера распределения температур в



топочном пространстве на каждой стенке топки равномерно по ее высоте расположены лючки в количестве 24 шт [98, (с. 12)].

В котельном агрегате применяется технология пылевидного сжигания смеси каменного угля разреза Каражыра и газов (сжигание аэросмеси). Всего имеется четыре индивидуальные системы приготовления аэросмеси. Каражыринский уголь размалывается четырьмя молотковыми мельницами с центробежным сепаратором типа ММТ 1300/1310/750К, каждая из которых имеет расчетную производительность по каменному углю 6,5 т/ч. Размол производится за счет многократных ударов материала билами (молотками). Размолотый уголь смешивается с горячим воздухом из воздухоподогревателя и частью рециркулирующих дымовых газов, и далее с помощью сушильно-вентилирующих агентов выносятся из зоны размола в сепаратор, где крупные фракции отделяются и возвращаются на доизмельчение в мельницу. Готовая аэросмесь пройдя по пылепроводам прямым вдуванием подается в топочную камеру [98, (с. 12)].

Для забора и подачи воздуха в систему установлены два дутьевых вентилятора типа ВД-15,5К. Уходящие дымовые газы удаляются из котла двумя дымососами типа ДН-24К, рециркуляция дымовых газов производится с помощью дымососа типа ДРГ-13,5УК. Очистка дымовых газов от золы осуществляется электрическим фильтром [98, (с. 12)].

В вынесенном опускном газоходе котла размещены кубы рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя. В воздухоподогревателе предусмотрено три хода по воздушной стороне и четыре потока по газовой стороне. Теплоизоляция ВЗП выполнена из базальтовых матов в обкладке из холста и стеклоткани [102].

Трубы ВЗП диаметром 40×1,5 мм расположены в шахматном порядке. Дымовые газы проходят внутри труб, а нагреваемый воздух омывает их снаружи поперечным током. Направление дымовых газов сверху вниз. Количество труб в одном ряду поперек  $z_1$  и вдоль  $z_2$  потока воздуха 132 и 81 соответственно. На рисунке 13 показана средняя температура дымовых газов в трех характерных температурных областях воздухоподогревателя при работе котла КВТ-116,3-150 на номинальной теплопроизводительности [101, (с. 86)]. В области входа продуктов сгорания в воздухоподогреватель и выхода нагретого воздуха температура теплоносителей максимальная. Наименьшая температура теплоносителей соответствует области уходящих дымовых газов и входа холодного воздуха. Для поддержания температуры стенки ВЗП, превышающей температуру точки росы топлива, применяют предварительный нагрев воздуха до 30 °С в паровых калориферах типа СП-90-28-1 (4 штуки) перед его подачей в ВЗП.

Согласно показаниям контрольно-измерительных приборов котла при работе котла на номинальной мощности зафиксирована средняя скорость дымовых газов в воздухоподогревателе равная 13 м/с, концентрация золовых частиц в газовом потоке  $65 \div 70$  г/м<sup>3</sup>. Параметры дымовых газов на входе и выходе из ВЗП, параметры воздуха на входе в ВЗП регистрируются

стационарными приборами установленными на котельном агрегате в режиме рабочего времени.

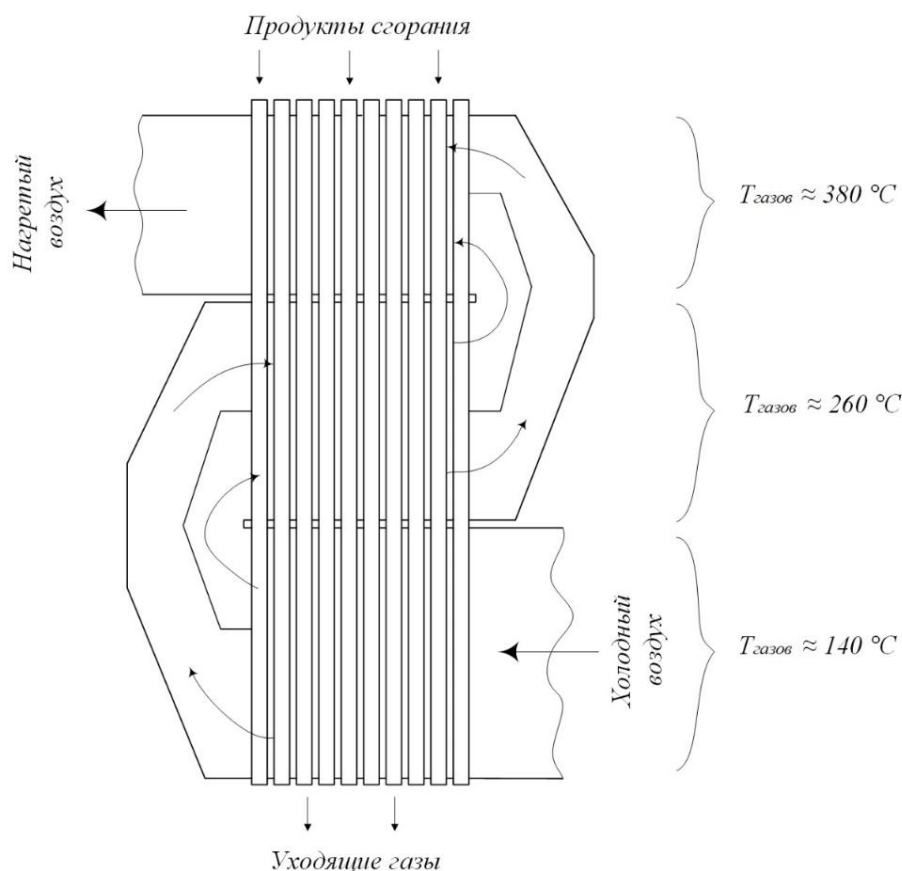


Рисунок 13 – Средняя температура дымовых газов в трех характерных температурных областях воздухоподогревателя [101, (с. 86)].

Шлакование конвективных поверхностей нагрева воздухоподогревателя в первую очередь зависит от режимных условий топки [103, 104]. Для установления режимных условий топочной камеры котла, обеспечивающих: отсутствие шлакования радиационных поверхностей и как следствие, отсутствие шлакования конвективных поверхностей воздухоподогревателя, максимально полное сжигание топлива, надежную циркуляцию в котле и минимальные потери теплоты необходимы исследования по определению оптимального режима работы топки [105].

### 2.3 Экспериментальное определение температуры продуктов сгорания в топочном пространстве и температуры теплообменной поверхности воздухоподогревателя

Режим работы топочного пространства, при котором обеспечивается наибольшая экономичность горения, минимальное шлакование радиационных и конвективных поверхностей нагрева, надежные температурные и гидродинамические условия работы теплообменных поверхностей считается оптимальным. На современных котельных агрегатах возможности

регулирования положения факела продуктов сгорания в топочном пространстве весьма ограничены, поэтому необходимо определять эти возможности с учетом местных условий. При пылевидном сжигании каменных углей с применением прямого вдувания аэросмеси изменение положение факела достигается путем воздействия на поток нагретого воздуха. О положении факела можно судить по его температурному профилю.

В топках пылеугольных котельных агрегатов с сухим шлакоудалением при нормальном расположении факела его ядро должно быть равноудаленным от всех стен с концентрацией на уровне горелок, сам факел должен равномерно заполнять всю топочную часть и не касаться боковых стенок [99, 105]. Положение факела в топке определяли инструментальными замерах изотермических полей (температуры газов в топке котла) с помощью высокотемпературного оптического пирометра М67, технические характеристики которого представлены в таблице 2 и визуальным наблюдением через лючки по объему топочной камеры (рисунок 14).

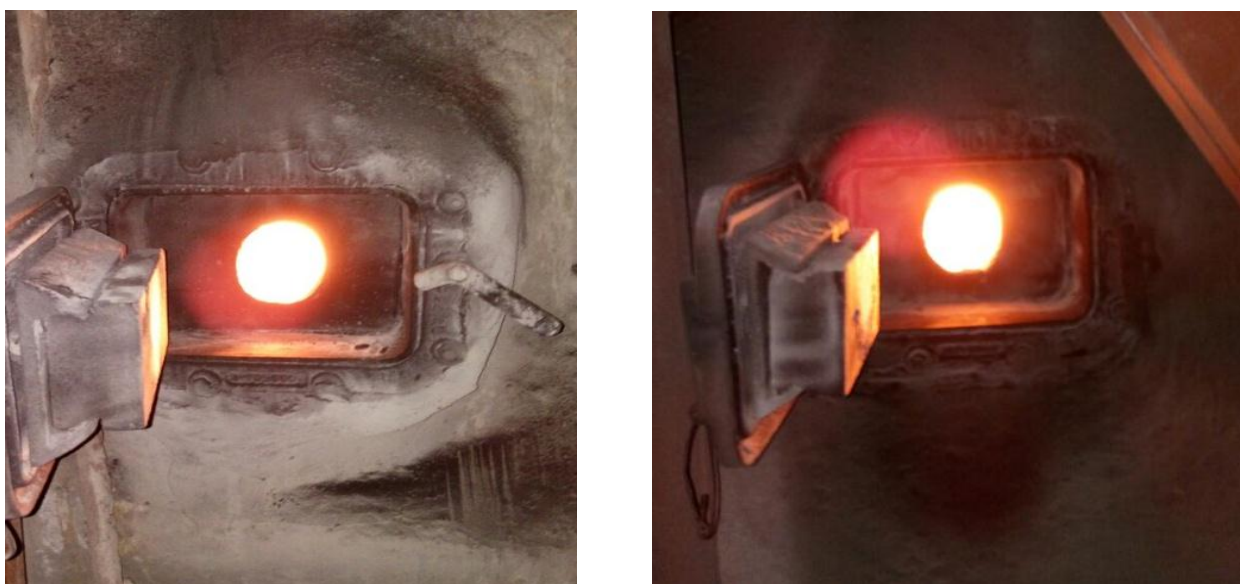


Рисунок 14 – Лючки по объему топочной камеры

Таблица 2 – Основные технические характеристики пирометра М67.

Технические данные	Параметры
Диапазон измеряемых температур	от -40 до +3000°С
Температурное разрешение	±0,1% от шкалы температур
Погрешность измерения по абсолютно черному телу	±0,5% от шкалы температур
Время отклика	от 50 ÷ 100 мс
Температура окружающей среды	0 ÷ 50 °С
Масса	0,9 кг

Для определения оптимального режима работы топки достаточно проведения четырех опытов. Опыты проводились на работающем котле при разной теплопроизводительности и установившемся режиме работы котла.

Измерение температуры газов в топке (2 ÷ 3 раза за опыт) проводилось через все имеющиеся на ограждениях лючки (рисунок 14), глазки, расшлаковочные люки, длительность каждого режима опыта 3 часа. При проведении опытов согласно [105] подача топлива на боковые горелки была несколько меньшей нежели на фронтные горелки. Сравнение полученных результатов проводилось путем построения и анализа графиков изотерм факела, наносимых на эскизах развертки топки [9, (с. 95 - 96)].

Изотермические поля факела наносились на предварительно выполненный ряд одинаковых эскизов развертки топки в масштабе 1 : 100, на которых указывались координаты отдельных точек измерений и их нумерация. Значения температуры газов в каждой точке измерения позволяют в процессе наладки работы топочного пространства более правильно отрегулировать положение факела [100]. При снятии характера распределения изотерм в топке через лючки принималось условно, что температура факела в отдельных его частях остается постоянной в течение всего времени измерения. Также принималось допущение, что температура продуктов сгорания между соседними контрольными точками изменяется линейно. Для изображения изотерм в топке бралось по ее эскизу расстояние между двумя точками измерения, на которое делилась разность температур в этих точках. Затем находились точки, через которые должны проходить линии, соответствующие промежуточным температурам 1200, 1250°С и тд [9, (с. 95 - 96)].

Для безопасного внутреннего обследования поверхностей нагрева опускного газохода термографическая съемка поверхностей нагрева опускного газохода при помощи термографа IRTIS – 2000 (рисунок 15) проводилась на остановленном котле. Термографическому обследованию подвергалась вся доступная для этого поверхность по периметру [9, (с. 95)].

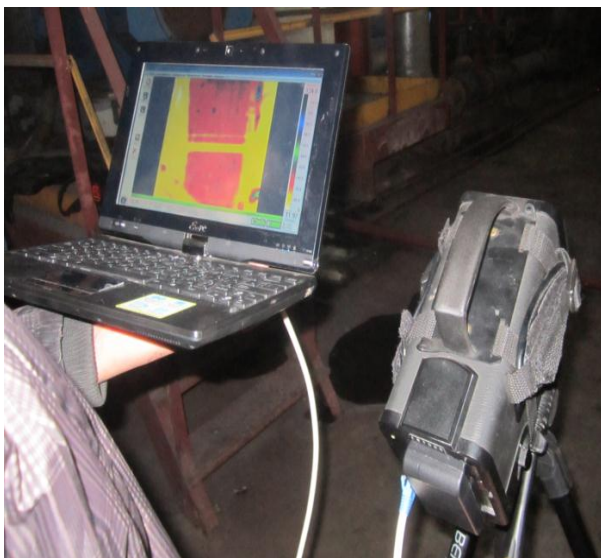


Рисунок 15 – Термограф IRTIS-2000, охлаждаемый жидким азотом

Термограф IRTIS-2000, охлаждаемый жидким азотом предназначен для сканирования теплового излучения поверхности тела и представлении данных в виде термографического изображения. При проведении измерений термографом определяется поверхностная температура объекта. С помощью данного прибора нельзя «заглянуть внутрь» объекта или увидеть его насквозь [106].

Для качественного проведения измерений необходимо определить оптимальное расстояние до измеряемого объекта и расстояние максимально видимого измеряемого объекта учитывая следующие переменные:

- поле зрения;
- наименьший видимый объект;
- наименьший измеряемый объект / область замера.

Поле зрения представляет собой область, видимую термографом. Размеры данной площади определяются объективом [106]. Знание наименьшего видимого объекта необходимо для определения размера пикселя кадра в зависимости от расстояния. В камере термографа установлена зеркально-линзовая оптика с небольшой отражательной способностью, это позволяет снизить погрешности измерений и упростить ее наладку. Основные технические данные инфракрасной камеры IRTIS-2000 представлены в таблице 3 [107].

Таблица 3 – Основные технические данные инфракрасной камеры IRTIS-2000

Технические данные	Параметры
Диапазон измеряемых температур	-20 ... +300°C
Температурное разрешение	0,05°C
Погрешность измерения по абсолютно черному телу	1,0°C
Тип охладителя	жидкий азот
Разрешение по горизонтали	640 элементов в строке
Разрешение по вертикали	480 строк
Поле зрения	25 градусов по горизонтали 20 градусов по вертикали
Время формирования кадра	0,8; 1,6; 3,2 сек.
Время работы на одной заправке жидким азотом (150 мл)	6 часов
Влажность при работе	30÷80%
Потребляемая мощность	1,2 ВА
Диапазон рабочих температур	-20 ... +50°C
Влажность при работе	30 ÷ 80 %
Размеры камеры	200x140x100 мм
Масса камеры	1,4 кг



Для получения точных значений температуры поверхности измеряемой термографом необходимо задать точное значение излучательной способности измеряемого тела [108]. Способность тел поглощать и испускать энергию излучения характеризуется степенью черноты, которая зависит от природы тела, его температуры и состояния поверхности. В термографе степень черноты учитывается вводом значения от 0 до 1.

Степень черноты, загрязненной и очищенной поверхностей опускного газохода определялась путем эталонного измерения температуры поверхности высокоточным цифровым температурным датчиком (погрешность измерения  $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ ) [108]. Температурный датчик представляет собой хромель-копелевую термопару с цифровым дисплеем, для улучшения теплообмена между соприкасающимися поверхностями использовалась термопаста КПТ-8 (рисунок 16).

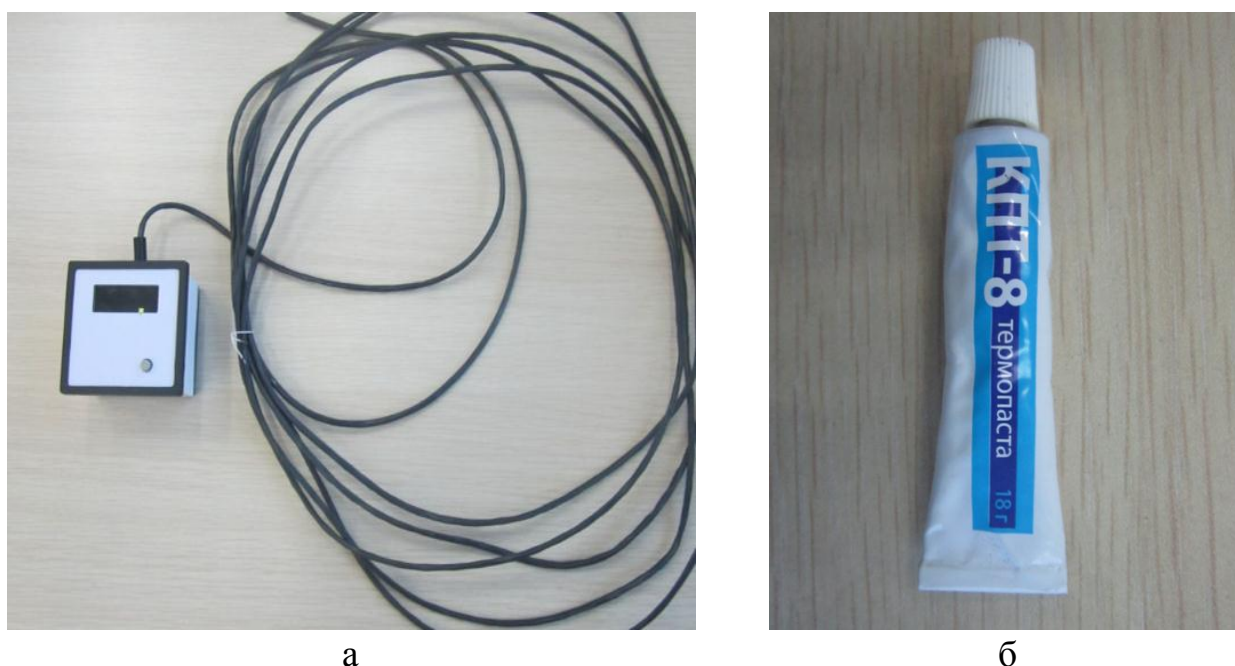


Рисунок 16 – Цифровой температурный датчик (а) и термопаста КПТ-8 (б)

Согласно методике эталонного измерения, температура поверхности измерялась сначала контактным температурным датчиком. Затем проводилось измерение температуры этой же поверхности термографом с предварительно заданной в приборе степенью черноты. Отличие в показаниях двух приборов, указывало на неверно заданную в термографе степень черноты. Корректировка значения степени черноты в настройках термографа проводилась до тех пор, пока температура, измеренная термографом, не соответствовала температуре, измеренной датчиком. Заданная при последнем измерении степень черноты соответствует степени черноты измеряемой поверхности [107, 108].

Полученные термографические снимки загрязненной и механически очищенной поверхности воздухоподогревателя обрабатывались с помощью программы IRPreview, являющейся неотъемлемой частью системы IRTIS [107]. Программный пакет IRPreview предназначен для отображения, анализа,

обработки, просмотра и распечатки термограмм, позволяет регулировать различные варианты цветовой гаммы наиболее четко представляющие термографический снимок объекта, записывать динамический термографический фильм, измерять абсолютное значение температуры в любой точке или области термографического изображения, конвертировать термограммы и данные, полученные в ходе обработки в стандартные форматы для последующего использования в другом программном обеспечении [107].

Измеренные пирометром температуры продуктов сгорания использовались для определения относительного расположения зон факела с различной температурой в топочной камере. Влияние заноса газового потока на работоспособность поверхности нагрева оценивалось по величине и составу образующихся в разных температурных зонах отложений золы. Результаты проведенных экспериментальных исследований процессов теплообмена в газоходах котла приводятся в следующем подразделе.

#### 2.4 Результаты исследования теплообмена в топочном пространстве котельного агрегата КВ-Т-116,3-150

При проведении экспериментальных исследований процессов теплообмена в газоходах котла КВ-Т-116,3-150 в установке сжигался непроектный каменный уголь марки Д разреза Каражыра Восточно-Казахстанской области с  $A^r = 21,4\%$ ,  $S^r = 0,26\%$  и избытке воздуха в конце топочной камеры  $\alpha = 1,15$ . Состав угля представлен на рисунке 17 [109].

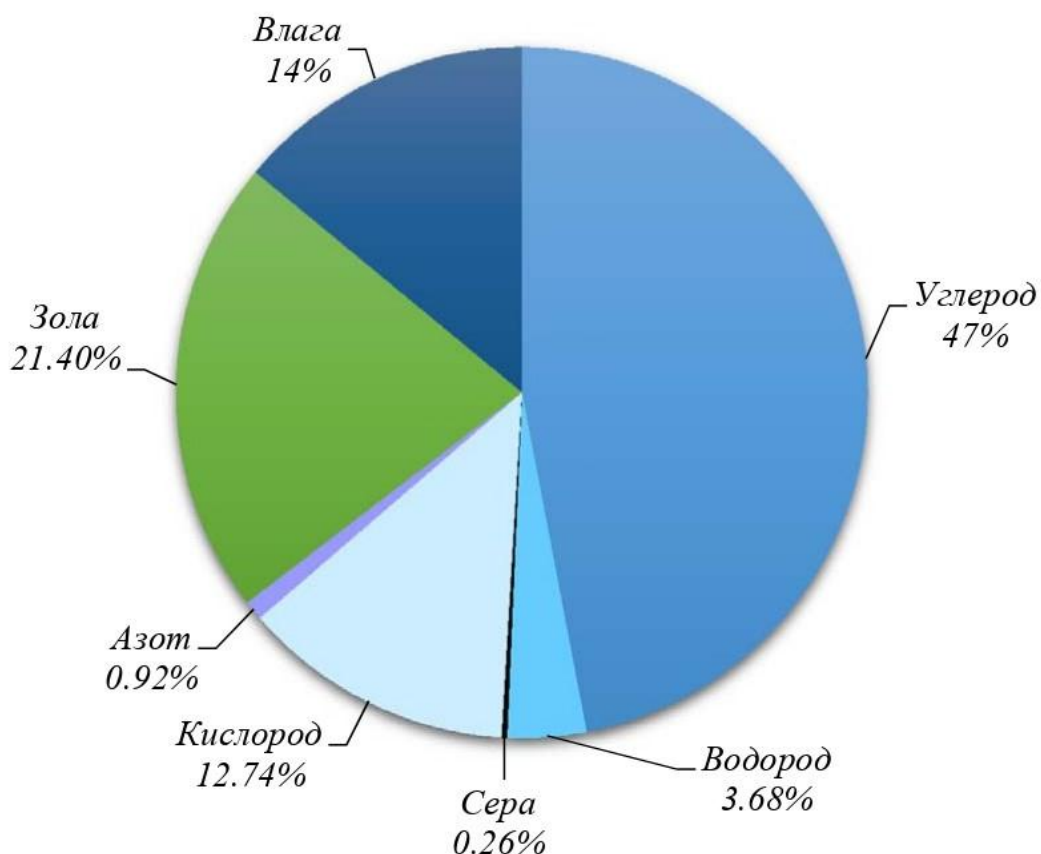


Рисунок 17 – Состав угля марки «Д» разреза «Каражыра» ВКО

При пылевидном сжигании топлива температура продуктов сгорания на выходе из топочной камеры не должна превышать температуру перед ширмами, размещаемыми в верхней части топки, что для угля Каражыра составляет 1100 °С [109].

По результатам пирометрического исследования поверхности нагрева топочного пространства были построены изотермические поля продуктов сгорания по фронтальной, правой и левой сторонам топки [9, (с. 95 -96)]. Установленный характер распределения температуры продуктов сгорания при производительности 50, 75, 80 ÷ 100 Гкал/ч представлен на рисунках 18, 19 и 20.

На рисунке 18 при минимальной теплопроизводительности наглядно представлено практически равномерное распределение температуры продуктов сгорания топлива в области горелок и по мере удаления от них. При теплопроизводительности 50 Гкал/ч на уровне горелок зафиксирована температура газов по фронтальной стенке 1510 °С, правой стенке 1515 °С, левой стенке 1517 °С. Расхождения температуры продуктов сгорания на уровне горелок по фронтальной стенке топки нет, по боковым сторонам топки составляет 2 °С.

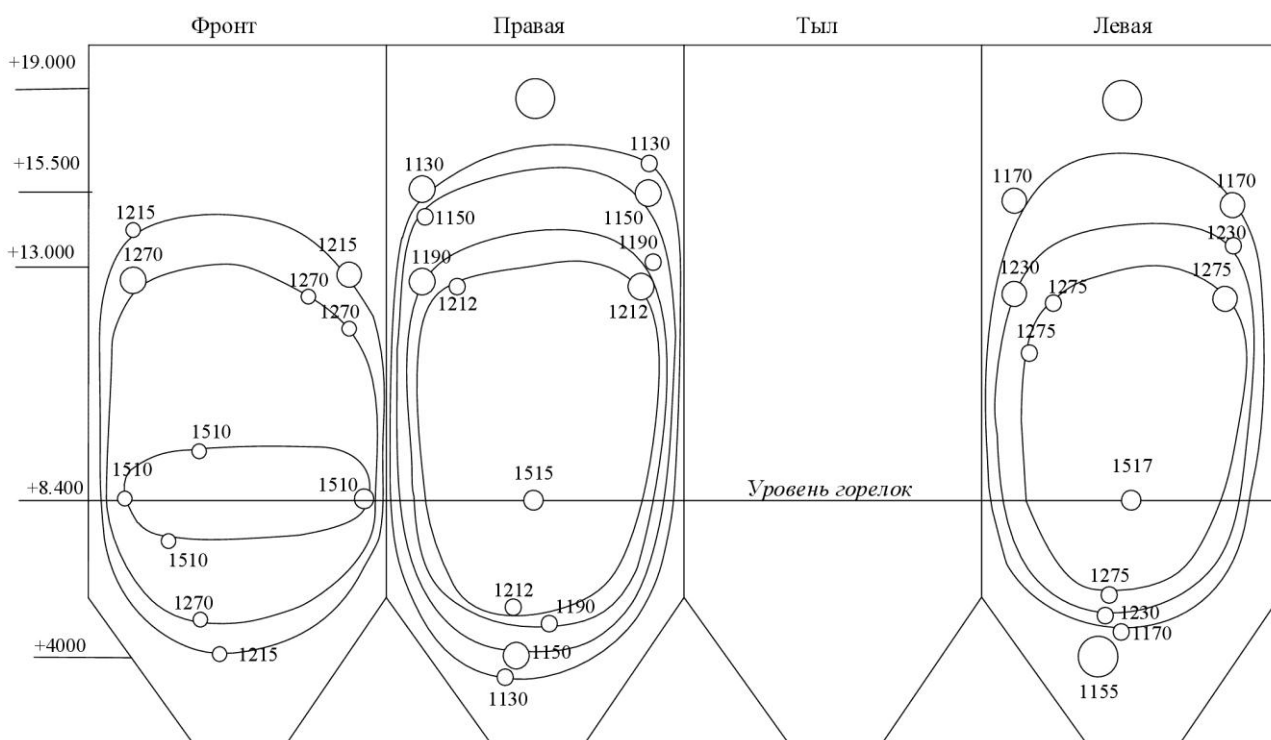


Рисунок 18 – Изотермические поля топки котельного агрегата при производительности 50Гкал/ч

Увеличение нагрузки котельного агрегата приводит к «вытягиванию» факела правой горелки по фронтальной стенке топки. С ростом теплопроизводительности данное явление усиливается. При теплопроизводительности 75 Гкал/ч (рисунок 19) по фронтальной стенке котла на уровне правой горелки зафиксирована температура 1452 °С, левой горелки 1440



°С, на уровне горелки правой стенки 1460 °С, левой стенки 1465 °С. Расхождение температуры продуктов сгорания на уровне горелок по фронтальной стенке топки составило 12 °С, расхождение температуры продуктов сгорания на уровне горелок по боковым сторонам топки составляет 5 °С.

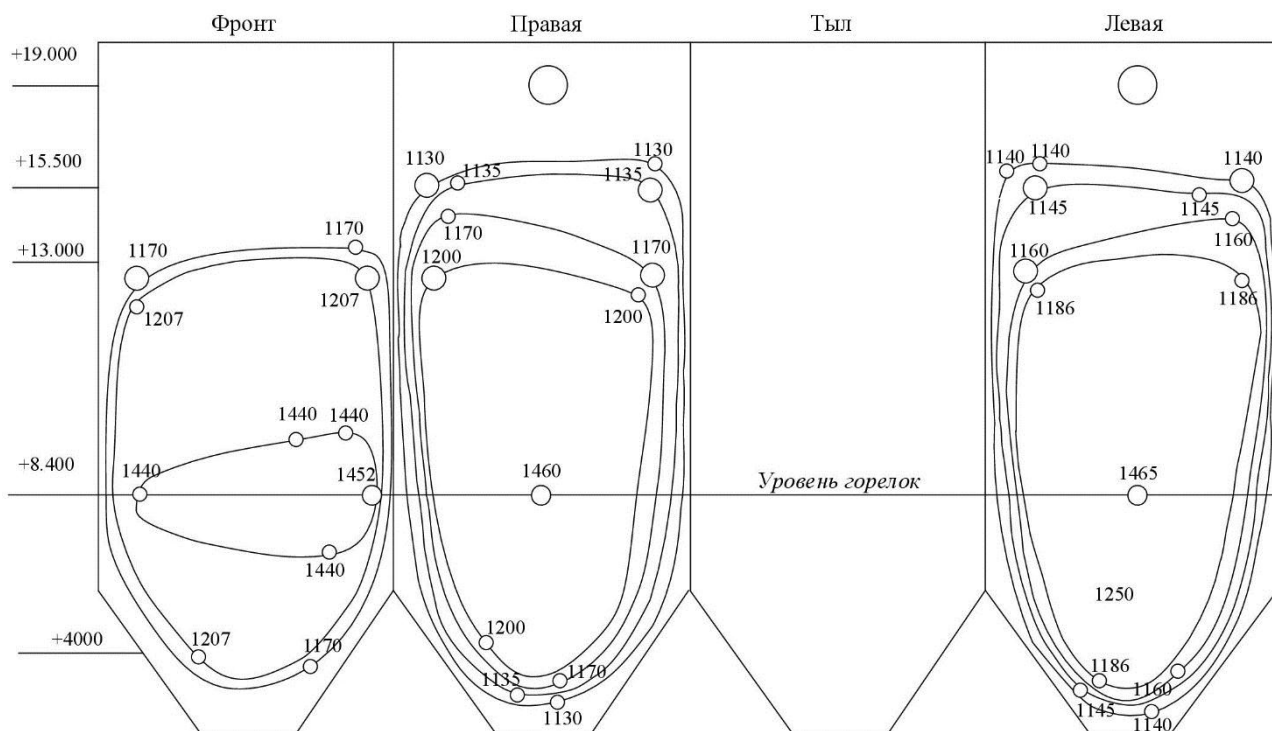


Рисунок 19 – Изотермические поля топки котельного агрегата при производительности 75 Гкал/ч.

При теплопроизводительности свыше 80 Гкал/ч (рисунок 20) расхождение температуры продуктов сгорания достигает максимального значения. По фронтальной стенке котла на уровне правой горелки зафиксирована температура газов 1550 °С, левой горелки 1520 °С, т.е. расхождение температуры продуктов сгорания на уровне горелок по фронтальной стенке топки достигло 30 °С. На уровне горелки правой стенки температура продуктов сгорания 1545 °С, левой стенки 1551 °С, соответственно по боковым сторонам топки расхождение температуры газов составляет 6 °С.

Из приведенных иллюстраций видно, что при минимальной нагрузке котельного агрегата горелки, выдающие в топку аэрозоль работают устойчиво. Анализ построенных изотермических полей продуктов сгорания при теплопроизводительности котла 50 Гкал/ч свидетельствует о полном и равномерном заполнении топочного пространства газовым факелом. Повышение теплопроизводительности котла сопровождается возникновением температурных перекосов вследствие удлинения факела газов правой горелки по фронтальной стенке топки. Причиной данного явления могут стать сбои, неправильная подача топлива и нагретого воздуха из воздухоподогревателя при повышенных нагрузках. Соответственно необходима регулировка работы горелок при заданных высоких мощностях.

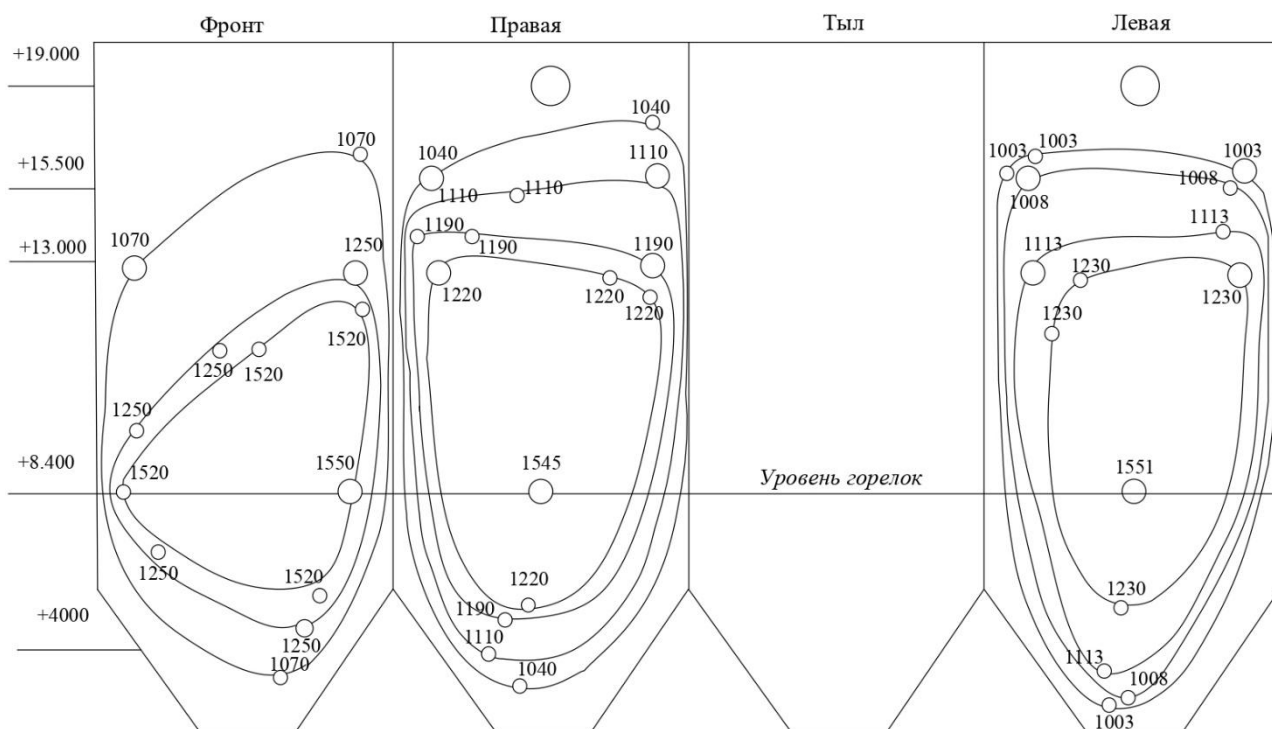


Рисунок 20 – Изотермические поля топки котельного агрегата при производительности  $80 \div 100$  Гкал/ч.

Применение рециркуляции дымовых газов, заключающееся в подаче в топочное пространство инертной среды с более низкой температурой, снижает температуру горения непроектного топлива, соответственно оптимальным будет режим работы топочного пространства при максимальной температуре горящих газов.

Максимальная температура продуктов сгорания на уровне горелок по фронтальной стенке котла 1550 и 1520 °С зафиксирована при теплопроизводительности котла свыше 80 Гкал/ч, исходя из этого, несмотря на имеющиеся температурные перекосы, оптимальным является режим работы установки при указанной мощности. Увеличение температуры горящих газов в топочном пространстве приводит к возрастанию температуры уходящих дымовых газов и увеличению потерь теплоты  $q_2$ , вследствие этого, для уточнения оптимального режима работы котельной установки далее необходимо определить потери теплоты при различной теплопроизводительности котла.

## 2.5 Результаты термографического исследования поверхностей нагрева опускного газохода

Визуальный осмотр поверхности ВЗП на остановленном котле показал, что в области входа продуктов сгорания в теплообменник скапливается меньшее количество отложений в сравнении с местом выхода дымовых газов из ВЗП. В области выхода дымовых газов из теплообменника наблюдается практически полное забивание трубок отложениями.

В результате проведенных исследований температуры поверхности воздухоподогревателя было установлено, что степень черноты загрязненной поверхности теплообменника выше, чем у очищенной и составляет 0,94 и 0,91 соответственно. При степени черноты поверхности тела более 0,7 все дальнейшие измерения температуры рекомендуется проводить бесконтактным способом [5].

Для установления характера изменения температуры поверхности нагрева воздухоподогревателя при наличии и отсутствии на ней отложений на термографических снимках поверхности (рисунки 21 и 22) была выбрана область анализа, которая отмечена контрольной линией I-I.

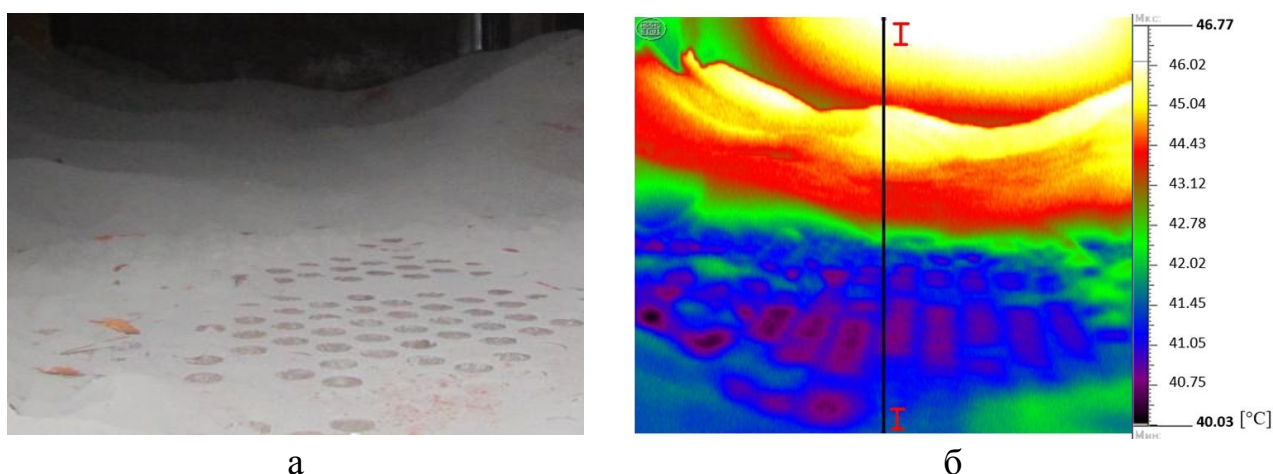


Рисунок 21 – Видимый участок загрязненной поверхности ВЗП (а) и его термографический снимок (б)

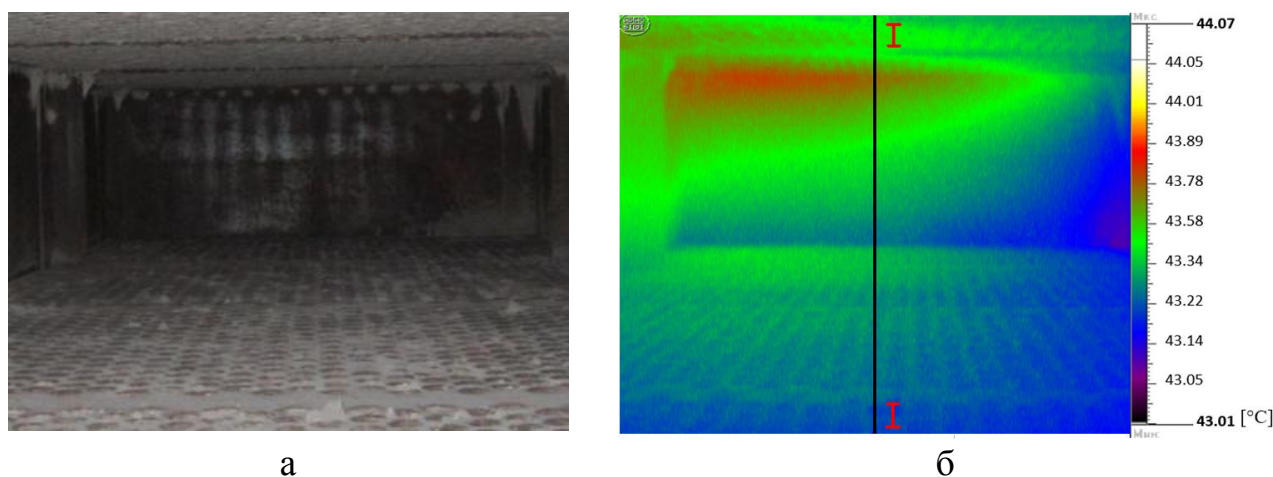


Рисунок 22 – Видимый участок очищенной поверхности ВЗП (а) и его термографический снимок (б)

График изменения температуры поверхности по контрольной линии I-I термографического снимка загрязненной поверхности ВЗП программного пакета IRPreview (рисунок 23) свидетельствует о наличии неравномерностей нагрева поверхности опускного газохода после останова котла. Во время работы котельного агрегата эта неравномерность, обусловленная наличием золовых отложений, будет только усиливаться. Температура поверхности по

контрольной линии I-I резко изменяется от минимальной 40,03°C до максимального значения, порядка 46°C соответствующего участкам, на которых имеются отложения из дымовых газов.

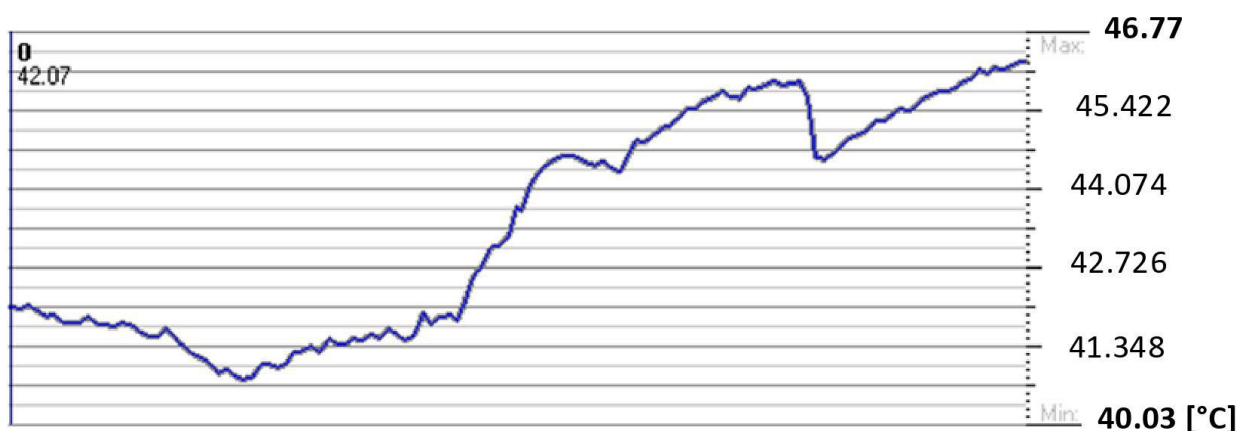


Рисунок 23 – График изменения температуры поверхности по контрольной линии I-I на термографическом снимке загрязненной поверхности ВЗП

Высокая температура отложений на поверхности ВЗП спустя месяц после останова котельного агрегата позволяет сделать следующие выводы: не успев сгореть в топочном пространстве частицы непроектного топлива с высокой температурой попадают в опускной газоход, в результате чего здесь возможно образование участков «догорания» топлива. Догорание топлива за пределами топочного пространства крайне нежелательный процесс, неминуемо приводящий к повреждениям низкотемпературных поверхностей нагрева опускного газохода, различного рода деформациям, разрыву и пережогу труб, выводу котельного агрегата из строя [103].

График изменения температуры поверхности по контрольной линии I-I термографического снимка очищенной поверхности воздухоподогревателя (рисунок 24) свидетельствует о выравнивании температур после очистки.



Рисунок 24 – График изменения температуры поверхности по контрольной линии I-I на термографическом снимке очищенной поверхности ВЗП

Температура поверхности по контрольной линии I-I термографического снимка очищенной поверхности воздухоподогревателя меняется незначительно и в среднем составляет порядка 43,6°С.

Таким образом показано, что своевременная очистка от отложений способствует равномерному прогреву стенок трубок воздухоподогревателя и предотвращению повреждений теплообменной поверхности.

Обеспечение и поддержание конвективных поверхностей нагрева в эксплуатационно - чистом состоянии является одним из необходимых условий надежной работы котельного агрегата в рабочем диапазоне нагрузок.

## 2.6 Выводы по разделу

Измерение оптическим пирометром применялось для общей оценки режима работы топочного устройства котлоагрегата. В результате проведенных исследований установлено, что на уровне горелок по всем сторонам топочной камеры при теплопроизводительности котла ниже 80 Гкал/ч расхождение температуры продуктов сгорания не превышает 25 °С. Ядро факела продуктов сгорания равноудаленно от всех стен камеры, заполняет всю топочную часть и не касается боковых стенок, что предотвращает сильное шлакование высокотемпературных поверхностей нагрева, однако температура горящих газов в топке на уровне горелок небольшая. Для обеспечения наиболее полного сжигания непроектного топлива при применении рециркуляции дымовых газов следует стремиться к высоким показателям температуры горения.

Максимальная температура газов на уровне горелок зафиксирована при нагрузке котла **свыше 80 Гкал/ч**, ввиду этого данный режим работы считается **оптимальным**. Повышение нагрузки сопровождается возникновением температурных перекосов, вследствие удлинения факела правой горелки по фронтальной стенке топки. При высокой теплопроизводительности котла необходимо регулировать и корректировать подачу топлива и воздуха в топочную камеру с целью предотвращения температурных перекосов факела продуктов сгорания и предотвращению уноса и догорания частиц топлива вне топочного пространства. Результаты пирометрического определения температуры продуктов сгорания соответствуют теоретически рассчитанным согласно [28] и на выходе из топки не превышают 1100 °С.

При тепловизионном обследовании воздухоподогревателя с целью калибровки термографа температура поверхности измерялась высокоточным цифровым температурным датчиком (99,8%). Установлена степень черноты загрязненной и очищенной поверхности опускного газохода, которая составила 0,94 и 0,91 соответственно.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены температуры продуктов сгорания в топочном пространстве и на выходе из него, температуры стенки трубок и золовых отложений на поверхности воздухоподогревателя, которые в дальнейшем использовались в качестве исходных данных для моделирования процессов теплообмена в воздухоподогревателе и верификации разработанной компьютерной модели.

Проведенное исследование поверхностей нагрева воздухоподогревателя свидетельствует о необходимости качественной и своевременной очистки опускного газохода с целью обеспечения эффективности и экологичности работы котельного агрегата.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ВЗП В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА

В настоящем разделе приводятся этапы построения расчетной модели, необходимые допущения и результаты компьютерного моделирования процесса теплообмена в ВЗП. Разработанная трехмерная компьютерная модель защищена свидетельством о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №14347 от 11.01.2021 г. (Приложение А) [110]. Основные положения раздела опубликованы в работе [101].

#### 3.1 Особенности исследования теплообмена в среде Ansys Fluent

Конвективный теплообмен описывается системой дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения теплоотдачи, уравнения энергии, уравнения движения, уравнения неразрывности и условиями однозначности (начальными и граничными условиями) с большим количеством переменных. В среде Ansys Fluent законы сохранения массы, импульса и энергии выражаются в терминах уравнений в частных производных, которые дискретизируются с помощью метода конечных элементов [89, (с. 411)].

Уравнение неразрывности потока [101, (с. 88 - 89)] выводится на основе закона сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_z v_z)}{\partial z} = 0 \quad (33)$$

Здесь  $v_x$ ,  $v_y$  и  $v_z$  – компоненты вектора скорости в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно;

$\rho$  – плотность;

$\tau$  – время.

Скорость изменения плотности [101, (с. 88 - 89)] может быть заменена скоростью изменения давления и скоростью, при которой плотность изменяется с давлением:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \quad (34)$$

где  $P$  – давление.

Оценка производной плотности по давлению [101, (с. 88 - 89)] выводится из уравнения состояния.

Для сжимаемой среды:

$$\rho = \frac{P}{RT} \Rightarrow \frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{RT} \quad (35)$$

где  $R$  – постоянная газа;

$T$  – температура.

Уравнения импульса [89, 101], без дальнейших предположений относительно свойств, выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_x}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} \\ = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_y}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial z} \\ = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_z}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} \\ = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (38)$$

В уравнениях  $g_x$ ,  $g_y$ ,  $g_z$  – компоненты ускорения силы тяжести в направлениях  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно;

$\mu$  – динамическая вязкость;

$R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  – любые исходные источники, которые пользователь может добавить.

Примером  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  является распределенное сопротивление, используемое для моделирования эффекта некоторого геометрического объекта без моделирования его геометрии [101, (с. 88 - 89)].

Уравнение теплопроводности является частным случаем уравнения сохранения энергии:

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho} \quad (39)$$

где  $q_v$  – объемная плотность теплового потока, Вт/м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К).



Здесь полная производная по времени  $\frac{D}{dt}$  учитывает процесс переноса тепла, вызванный движением имеющих различную температуру элементов потока жидкой (газообразной) среды [101, (с. 88 - 89)]:

$$\frac{D}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (40)$$

Таким образом, для проведения моделирования процесса теплообмена в ВЗП использовались управляющие уравнения неразрывности потока, законы сохранения массы, импульса и энергии.

### 3.2 Построение расчетной модели ВЗП котельного агрегата

На рисунке 25 представлена трехмерная фигура воздухоподогревателя котельного агрегата, выполненная в программном комплексе Ansys Fluent. Движение дымовых газов внутри труб и воздуха по межтрубному пространству в ВЗП перекрестно – противоточное [101, (с. 87)].

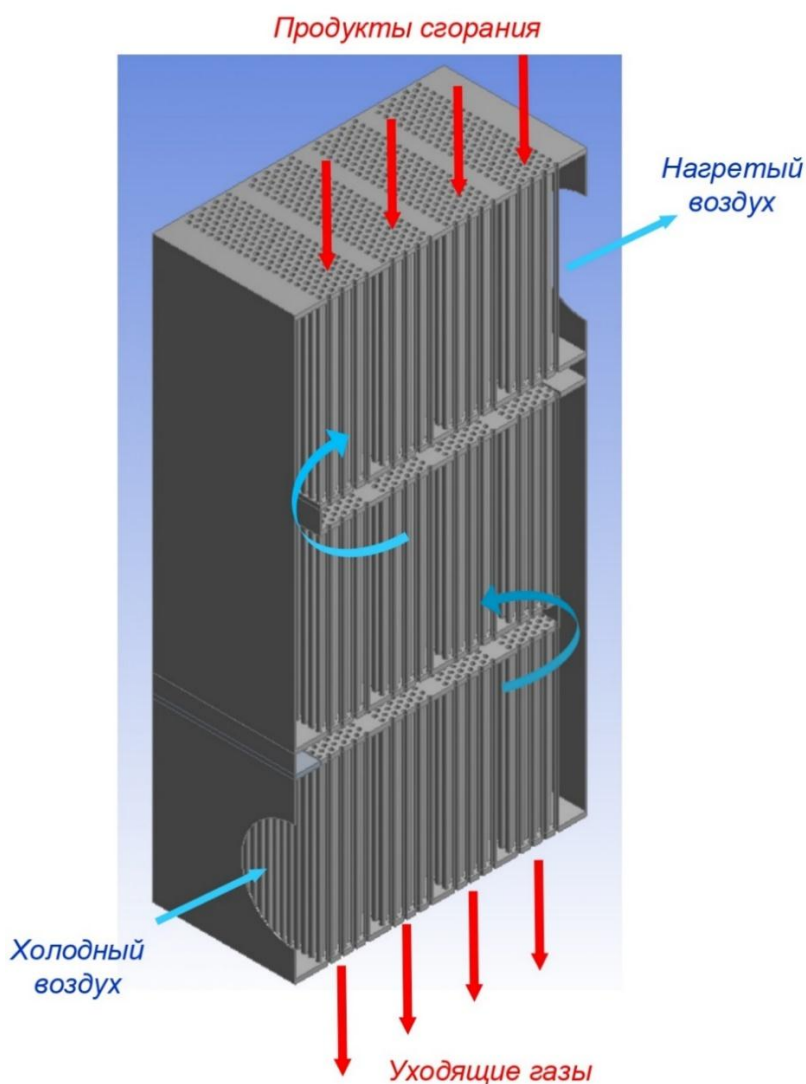


Рисунок 25 – Трехмерная фигура ВЗП котла

Из предыдущих разделов диссертации известно, что одним из главных этапов решения задачи является разбиение модели сеткой конечных элементов, то есть разделение геометрии на элементы, которые связаны между собой узлами. Количество элементов сетки оказывает существенное влияние на точность расчета. Как видно на рисунке 25 воздухоподогреватель имеет сложную геометрию. Толщина стенок трубок ( $\sigma_{ст}$ ) составляет 1,5 миллиметра, тогда как высота ВЗП (h) равна 13,9 метрам. Проведение вычислительного расчета при разделении представленной трехмерной фигуры ВЗП на сетку огромного числа мелких конечных элементов не представляется возможным.

Учитывая вышеизложенное, ввиду симметричной и периодичной структуры теплообменника необходимо выделить участок для проведения расчетного исследования процесса теплообмена при условиях наличия и отсутствия загрязнений на поверхности ВЗП (рисунок 26). Выделенный участок, проходит между осями двух соседних рядов трубок ВЗП и захватывает половину трубок одного ряда и половину следующего.

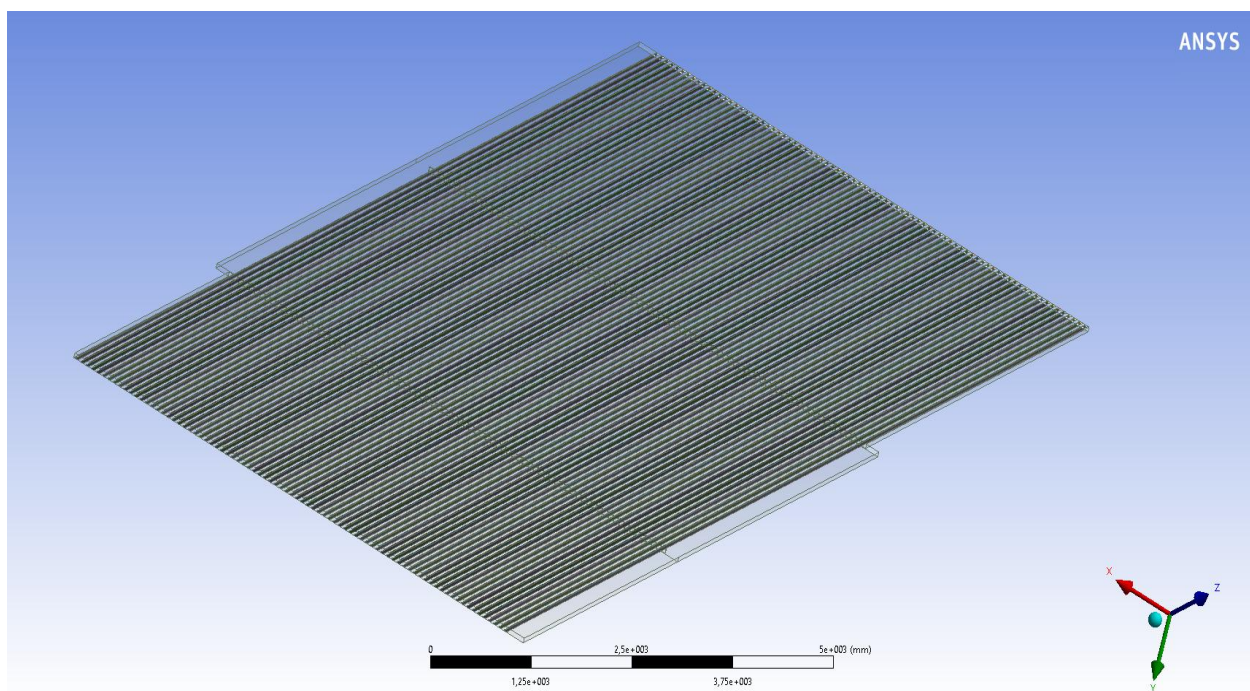


Рисунок 26 – Расчетная модель ВЗП

Для моделирования процессов теплообмена использовались граничные условия третьего рода, которые задавались неизменной температурой воздуха на входе в теплообменник 30 °С, температурой дымовых газов на входе и выходе из теплообменника в зависимости от нагрузки котла, температурой стенки (среднеарифметическое значение между температурами воздуха и газа).

В расчетной модели теплофизические свойства веществ (плотность, коэффициент теплопроводности, коэффициент вязкости) заданы в зависимости от температуры теплоносителей, учтены следующие физические процессы: конвективный теплообмен, теплопроводность, турбулентный режим движения теплоносителей. Заданные направления входа и выхода нагреваемого воздуха

показаны на рисунке 27. Аналогичным образом задавалось направление движения продуктов сгорания.

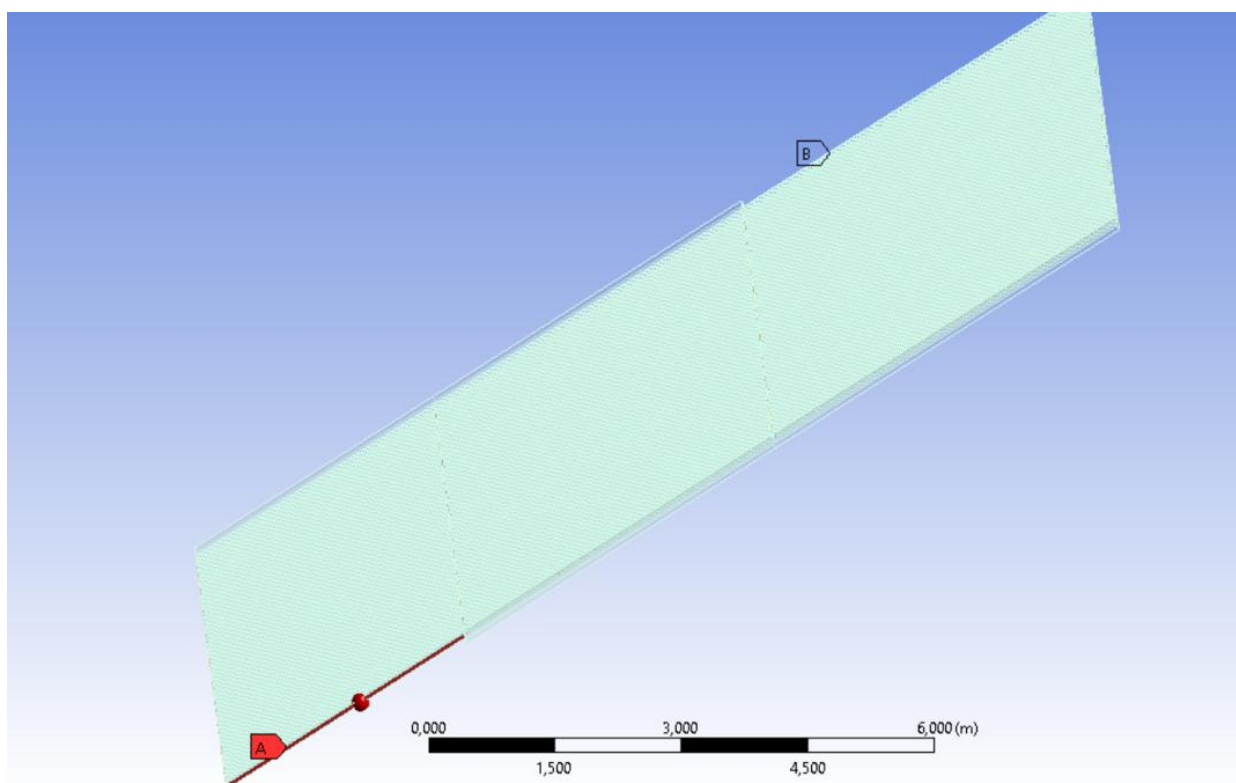


Рисунок 27 – Задание направления движения теплоносителя

Исходные данные для моделирования процессов теплообмена (фактические расходы воздуха и дымовых газов, температуры теплоносителей) взяты из журнала учета работы котла и по показаниям контрольно-измерительных приборов (расходомеры, термопары, температурные датчики).

Моделирование процесса теплообмена в воздухоподогревателе было проведено для определения температуры и скорости теплоносителей [101, (с. 87)].

### 3.3 Определение эффективной теплопроводности потока дымовых газов при чистой и загрязненной поверхности ВЗП

При моделировании было принято допущение, при котором стенка трубки не строилась из-за относительно малого размера. Создаваемое термическое сопротивление стенки учитывалось в расчете на основании [2 и 111] введением коэффициента эффективной теплопроводности потока дымовых газов (рисунок 28).

Эффективная теплопроводность газа и стенки рассчитывается по нижеприведенным формулам [2, 101, 111, 112].

Перепад температуры в газе определяется по формуле [101, (с. 89 - 90)]:

$$t_0 - t_r = \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_r} \quad (41)$$

где  $t_0$  – температура в центре газового потока, К;  
 $\lambda_r$  – коэффициент теплопроводности газа, Вт/(м·К).

Перепад температуры между газом и стенкой:

$$t_r - t_{c1} = \frac{q_l}{\pi \cdot \alpha_r \cdot d} \quad (42)$$

где  $t_r$  – температуры газа, К;  
 $t_{c1}$  – температура внутренней поверхности стенки, К;  
 $q_l$  – линейная плотность теплового потока, Вт/м;  
 $\alpha_r$  – коэффициент теплоотдачи газа, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $d$  – внутренний диаметр стенки, м.

Перепад температуры в стенке:

$$t_{c1} - t_{c2} = \frac{q_l \cdot \ln(D/d)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ст}} \quad (43)$$

где  $t_{c2}$  – температура внешней поверхности стенки, К;  
 $D$  – наружный диаметр стенки, м;  
 $\lambda_{ст}$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·К).

Уравнение распределения температуры в эквивалентном потоке газа определяется по формуле [2, 101, 111, 112]:

$$t_0 - t_{c2} = \frac{q_l}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{эф}} \quad (44)$$

где  $\lambda_{эф}$  – коэффициент эффективной теплопроводности потока газа, Вт/(м·К).

Сложив уравнения (41), (42), (43) и приравняв полученный результат к уравнению (44), получаем эффективную теплопроводность потока дымовых газов для чистой поверхности ВЗП:

$$\lambda_{эф} = \frac{1}{4 \cdot \left( \frac{1}{\alpha_r \cdot d} + \frac{\ln(D/d)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{ст}} + \frac{1}{4 \cdot \lambda_r} \right)} \quad (45)$$

При наличии загрязнений на поверхности ВЗП эффективная теплопроводность потока дымовых газов определяется по формуле:

$$\lambda_{\text{эфз}} = \frac{1}{4 \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{\Gamma'} \cdot d_3} + \frac{\ln(D/d)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{ст}}} + \frac{\ln(d/d_3)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{загряз}}} + \frac{1}{4 \cdot \lambda_{\Gamma}} \right)} \quad (46)$$

где  $\alpha_{\Gamma'}$  - коэффициент теплоотдачи газов с учетом толщины загрязнений, Вт/(м<sup>2</sup>·К) [2, 101, 111, 112].

Таким образом, моделируется теплообмен между «газовым стержнем» с эффективным коэффициентом теплопроводности (включает в себя коэффициент теплопроводности для стальной стенки и дымовых газов) и нагреваемым воздухом. Более подробные детали моделирования эффективной теплопроводности потока дымовых газов представлены в таблице 4 [101, (с. 87 – 88)].

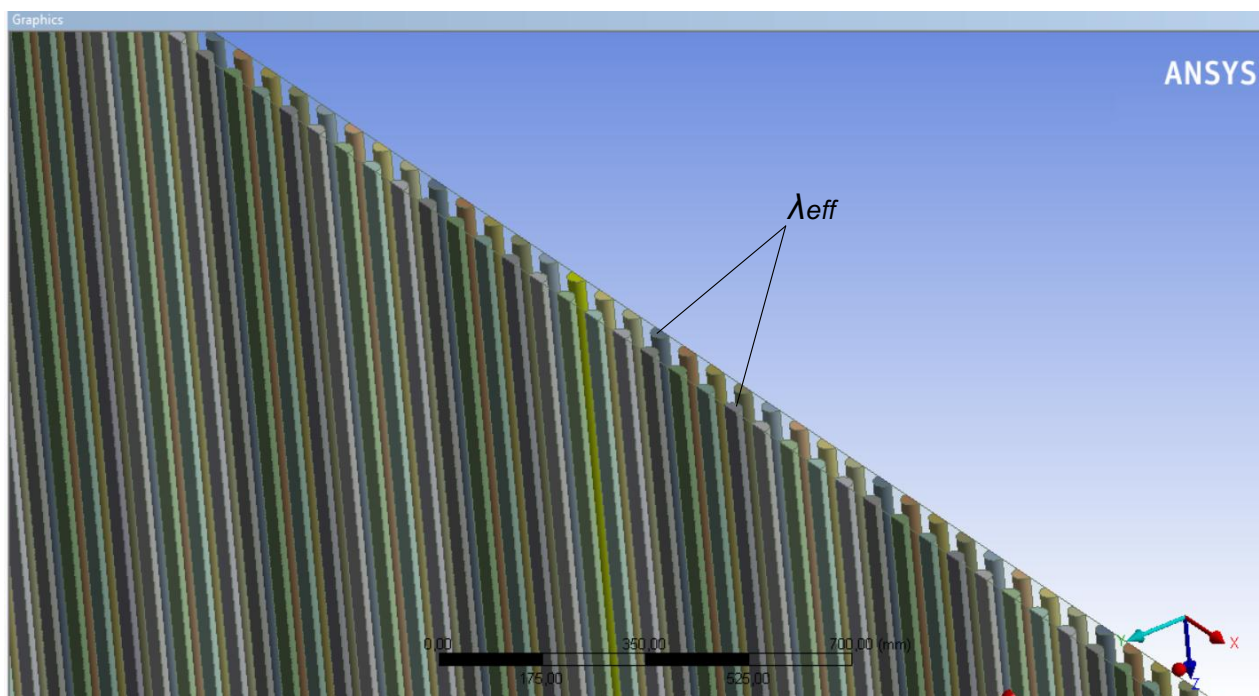


Рисунок 28 – Эффективная теплопроводность потока дымовых газов

Таблица 4 – Детали моделирования эффективной теплопроводности потока дымовых газов

Details View (Просмотр подробностей)	
Body (Тело)	gas
Volume (объем)	7,9922e+006mm3
Surface Area (Площадь поверхности)	1,3093e+006mm2
Faces	4
Edges (Края)	6
Vertices (Вершины)	4
Fluid / solid (Жидкое/ твердое тело)	Fluid

Для анализа задачи в качестве граничных условия использовался массовый расход теплоносителей, нахождение которого подробно описано в следующем подразделе.

### 3.4 Определение расхода теплоносителей в расчетной модели

Расход нагреваемого воздуха в расчетной модели определялся по нижеприведенным формулам:

1. Теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива  $V_0$ , м<sup>3</sup>/кг [28, (с. 87)]:

$$V_0 = 0,089C^r + 0,265H^r + 0,033(S_L^r - O^r) \quad (47)$$

где  $C^r$  – содержание углерода в топливе на рабочую массу, %;

$H^r$  – содержание водорода в топливе на рабочую массу, %;

$S_L^r$  – содержание серы в топливе на рабочую массу, %;

$O^r$  – содержание кислорода в топливе на рабочую массу, %.

2. Расход воздуха  $G_B$  (м<sup>3</sup>/с) учитывая расход топлива [28, (с. 87)]:

$$G_B = V_0 \cdot B_T \quad (48)$$

где  $B_T$  – расход топлива, кг/с.

3. Полный расход нагретого воздуха с учетом плотности потока  $M_{B \text{ ПОЛН}}$ , кг/с:

$$M_{B \text{ ПОЛН}} = G_B \cdot \rho_B \quad (49)$$

где  $\rho_B$  – плотность воздуха в зависимости от температуры кг/м<sup>3</sup>.

4. Расход нагретого воздуха в расчетной модели  $M_B$ , кг/с:

$$M_B = \frac{M_{B \text{ ПОЛН}}}{z_1} \quad (50)$$

где  $z_1$  – число труб поперек воздуха.

Расход дымовых газов в расчетной модели определялся по следующим формулам:

5. Общий объем дымовых газов  $\sum V$ , м<sup>3</sup>/кг [28, (с. 88)]:

$$\sum V = V_{\text{с.г.}} + V_{H_2O} \quad (51)$$

где  $V_{\text{с.г.}}$  – действительный объем сухих газов, м<sup>3</sup>/кг;

$V_{H_2O}$  – действительный объем водяных паров, м<sup>3</sup>/кг

6. Расход дымовых газов  $G_{\Gamma}$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) учитывая расход топлива:

$$G_{\Gamma} = \sum V \cdot B_{\Gamma} \quad (52)$$

7. Полный расход дымовых газов по всем трубкам ВЗП с учетом плотности потока  $M_{\Gamma \text{полн}}$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ :

$$M_{\Gamma \text{полн}} = G_{\Gamma} \cdot \rho_{\Gamma} \quad (53)$$

где  $\rho_{\Gamma}$  – плотность дымовых газов в зависимости от температуры  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

8. Для нахождения расхода дымовых газов в расчетной модели  $M_{\Gamma}$ ,  $\text{кг}/\text{с}$ , т.е. расхода в половине одной трубки, необходимо разделить полный расход дымовых газов на общее количество труб и на 2. В таблице 5 представлены результаты проведенных вычислений.

$$M_{\Gamma} = \frac{M_{\Gamma \text{полн}}}{2z_{\text{общ}}} \quad (54)$$

где  $z_{\text{общ}}$  – общее количество труб в ВЗП,  $z_{\text{общ}} = z_1 \cdot z_2$ .

Таблица 5 – Результаты вычислений для расчетной модели

Наименование величин	Значения
Теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива $V_0$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	4,773
Расход топлива $B_{\Gamma}$ , $\text{кг}/\text{с}$ (т/ч)	3,9 (14)
Расход воздуха $G_{\text{в}}$ с учетом расхода топлива, $\text{м}^3/\text{с}$	18,6
Полный расход нагретого воздуха с учетом плотности потока $M_{\text{в полн}}$ , $\text{кг}/\text{с}$	11,78
Расход нагретого воздуха в расчетной модели $M_{\text{в}}$ , $\text{кг}/\text{с}$	0,0892
Число труб поперек воздуха $z_1$ , штук	132
Общий объем дымовых газов $\sum V$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	7,316
Расход дымовых газов $G_{\Gamma}$ с учетом расхода топлива, $\text{м}^3/\text{с}$	28,53
Полный расход дымовых газов по всем трубкам ВЗП с учетом плотности потока $M_{\Gamma \text{полн}}$ , $\text{кг}/\text{с}$	14,93
Расход дымовых газов в расчетной модели $M_{\Gamma}$ , $\text{кг}/\text{с}$	0,000695
Общее число труб в ВЗП $z_{\text{общ}}$ , штук	10692
Коэффициент теплопроводности стенки $\lambda_{\text{с}}$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	45
Коэффициент теплопроводности газа $\lambda_{\Gamma}$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,057
Коэффициент эффективной теплопроводности потока газа для чистой поверхности ВЗП $\lambda_{\text{эф}}$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,024



При изменении температуры теплоносителей меняется температура стенки, что в свою очередь будет влиять на величину образования отложений и соответственно изменяется эффективная теплопроводность газа и стенки (это заложено в программе зависимостью коэффициента теплопроводности от температуры). Таким образом, модель учитывает изменение коэффициента эффективной теплопроводности потока дымовых газов в зависимости от температуры теплоносителей. В таблице 6 представлены основные данные заданные в численной модели [101, (с. 91)].

Таблица 6 – Основные параметры численной модели

General	
Type	Pressure-Based
Velocity Formulation	Absolute
Time	Steady
Gravity	yes
Models	
Energy	Energy Equation
Viscous Model	
Model	k-epsilon (2 eqn)
k-epsilon Model	Standard
Near-Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
Boundary Conditions	
Pressure-outlet	
Backflow Turbulent Intensity (%)	5
Inlet	
Mass Flow Rate of gases (kg/s)	0,000695
Mass Flow Rate of air (kg/s)	0,0892
Temperature of gases, K	653
Temperature of air, K	303
Solution Methods	
Pressure – Velocity Coupling	
Scheme	Simple
Spatial Discretization	
Gradient	Green-Gauss Node Based
Pressure	Standard
Momentum	Second Order Upwind
Turbulent Kinetic Energy	First Order Upwind
Turbulent Dissipation Rate	First Order Upwind
Solution Initialization	
Initialization Methods	Hybrid Initialization
Number of Iterations	300



Расчетная модель ВЗП состоит из 7663915 конечных элементов, что позволяет достичь высокой степени точности полученных результатов. Таким образом, для решения поставленных задач в программном комплексе Ansys Fluent была разработана трехмерная расчетная теплофизическая модель рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя [101, 110], в которой стенка трубки не строится из-за относительно малого размера. Создаваемое термическое сопротивление стенки учитывается в расчете путем введения коэффициента эффективной теплопроводности потока дымовых газов. Рассчитанные методом конечных элементов физические величины представляются в графическом окне Ansys Fluent в виде картинок.

### 3.5 Результаты компьютерного моделирования

На основании компьютерного моделирования получены температуры и скорости теплоносителей в каждой точке расчетной модели. На рисунке 29 представлены температуры теплоносителей в модели воздухоподогревателя при работе котла на номинальной теплопроизводительности. На рисунке схематично красными стрелками показано направление движения газов (вход продуктов сгорания в воздухоподогреватель и выход уходящих дымовых газов), синими стрелками показано направление движения воздуха (вход холодного воздуха в воздухоподогреватель и выход нагретого воздуха).

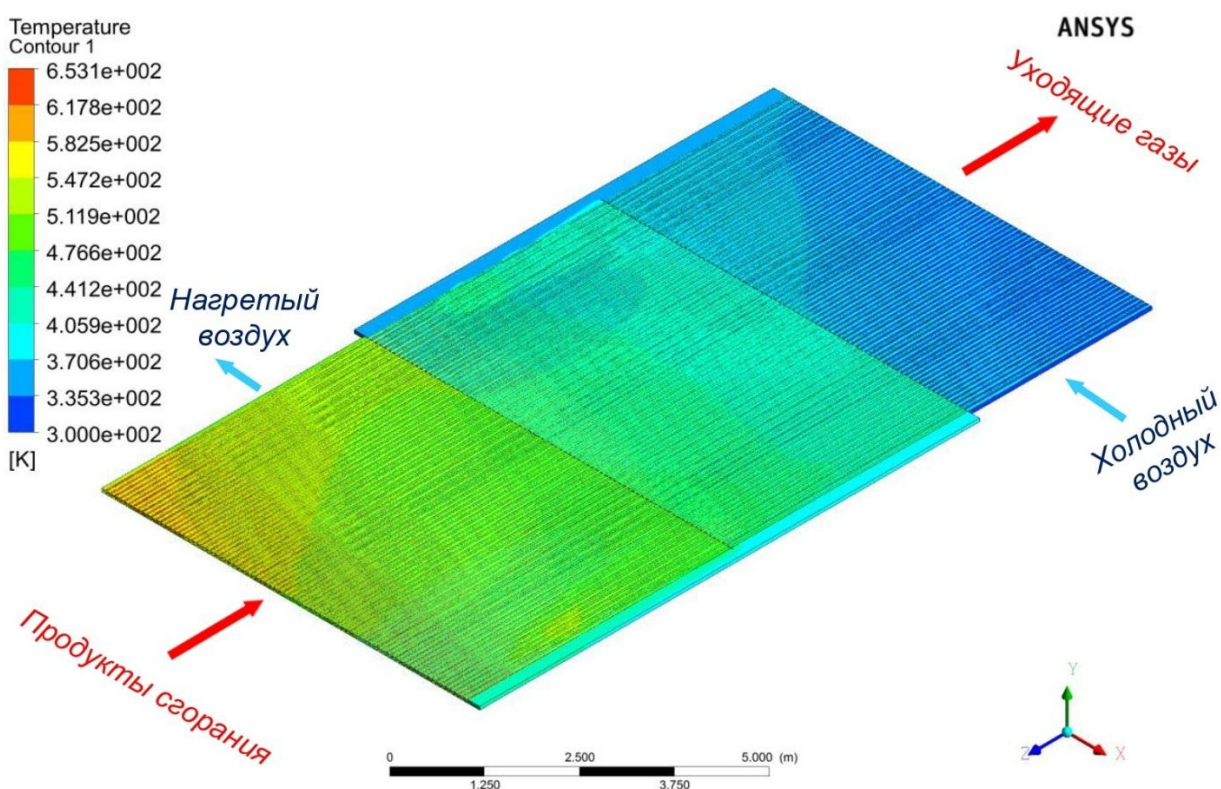


Рисунок 29 – Температуры теплоносителей в модели ВЗП

Как видно на рисунке 29, в процессе нагревания возникают неравномерности профиля температур в пределах одного хода воздуха. Данное явление можно объяснить закономерностями процесса теплопередачи.

Согласно Формуле Ньютона-Рихмана плотность теплового потока определяется выражением [2]:

$$q = \alpha \cdot (t_{ст} - t_{ж}) \quad (55)$$

Коэффициент теплоотдачи к воздуху зависит перепада температур между стенкой и нагреваемым воздухом, от перепада температур теплоносителей, изменения направления обтекания труб, поворотами потока после прохождения одного хода, режима течения теплоносителей. Соответственно плотность теплового потока будет разной, воздух прогревается неравномерно, в результате чего и образуются указанные неравномерности профиля температур в пределах одного хода воздуха.

На рисунках 30 и 31 более подробно представлены температуры теплоносителей в области входа продуктов сгорания в воздухоподогреватель и выхода дымовых газов из него [101, (с. 92)].

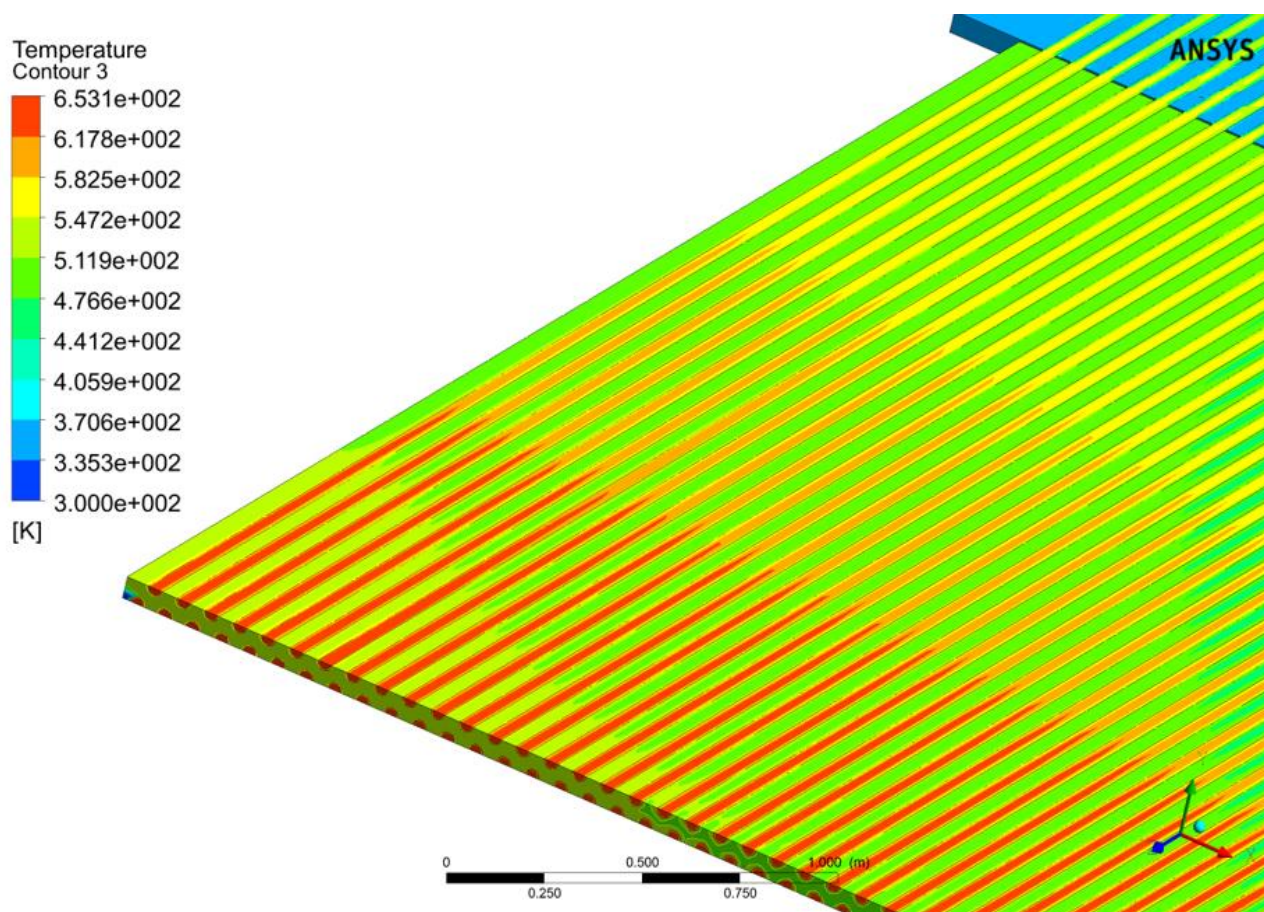


Рисунок 30 – Температуры теплоносителей в области входа продуктов сгорания в ВЗП



Как видно на рисунке 30 в области **входа продуктов сгорания в ВЗП** (так как схема движения теплоносителей перекрестно-противоточная данная область соответствует области **выхода нагретого воздуха из ВЗП**) температура теплоносителей, стенки и соответственно воздуха максимальная.

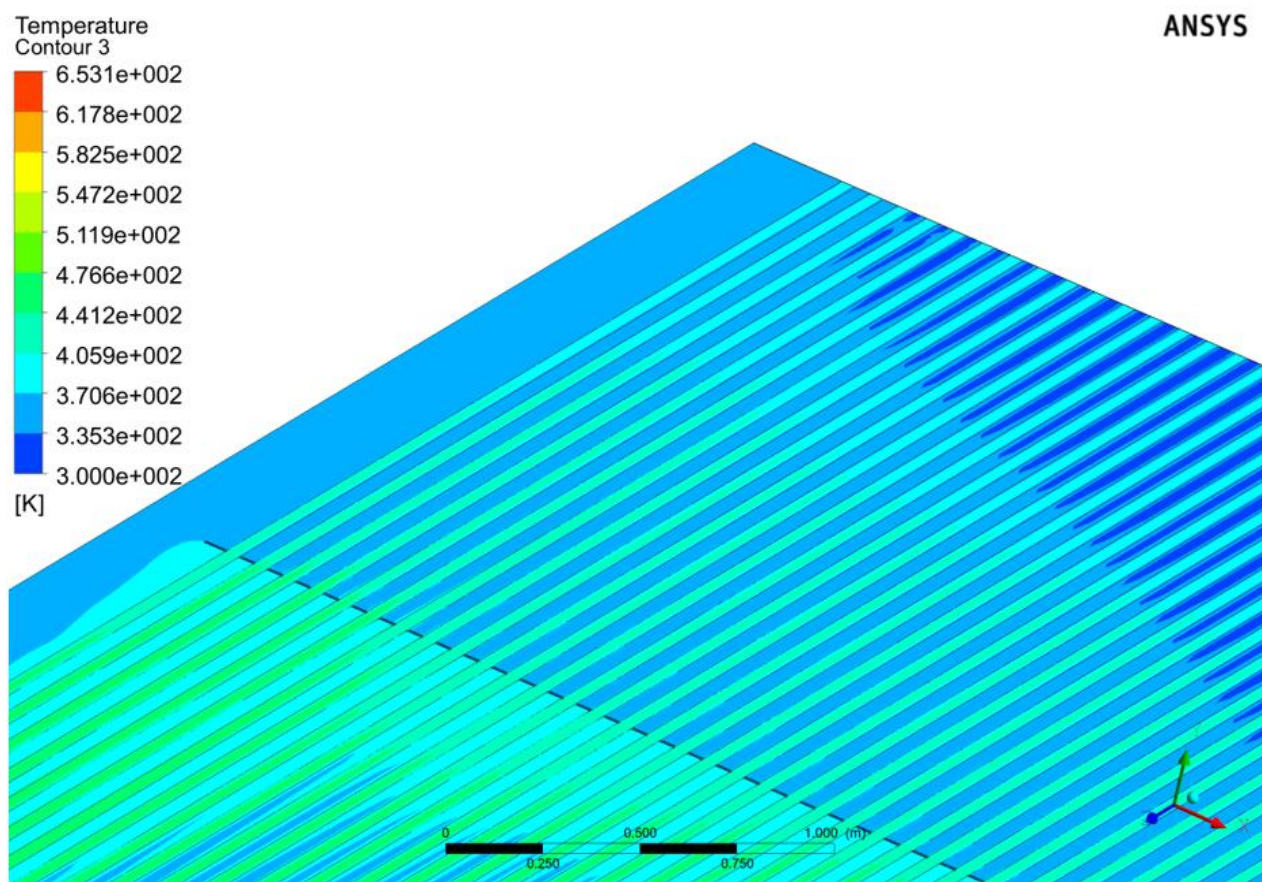


Рисунок 31 – Температуры теплоносителей в области выхода дымовых газов из ВЗП

На рисунке 31 показано, что в области выхода дымовых газов из теплообменника наблюдаются минимальные температуры теплоносителей.

Температуры теплоносителей, полученные в результате компьютерного моделирования процесса теплообмена в ВЗП, сравнивались с фактическими данными с контрольно-измерительных приборов котла КВТ-116,3-150.

Определено относительное отклонение результатов вычислений согласно [114]  $\gamma$ , %:

$$\gamma = \frac{|t_{\text{теор}} - t_{\text{факт}}|}{t_{\text{факт}}} \cdot 100 \quad (56)$$

Относительное отклонение результатов расчета температуры уходящих дымовых газов составило 2,45 %, а температуры нагретого воздуха – 2,34 %. Таким образом результаты компьютерного моделирования хорошо согласуются

с имеющимися фактическими данными, относительное отклонение результатов вычислений не превышает 3 %.

На рисунке 32 представлено распределение скорости продуктов сгорания в области входа их в ВЗП при работе котла на номинальной теплопроизводительности. Средняя скорость продуктов сгорания составляет 12 м/с, средняя скорость воздуха 5,2 м/с [101, (с. 92)].

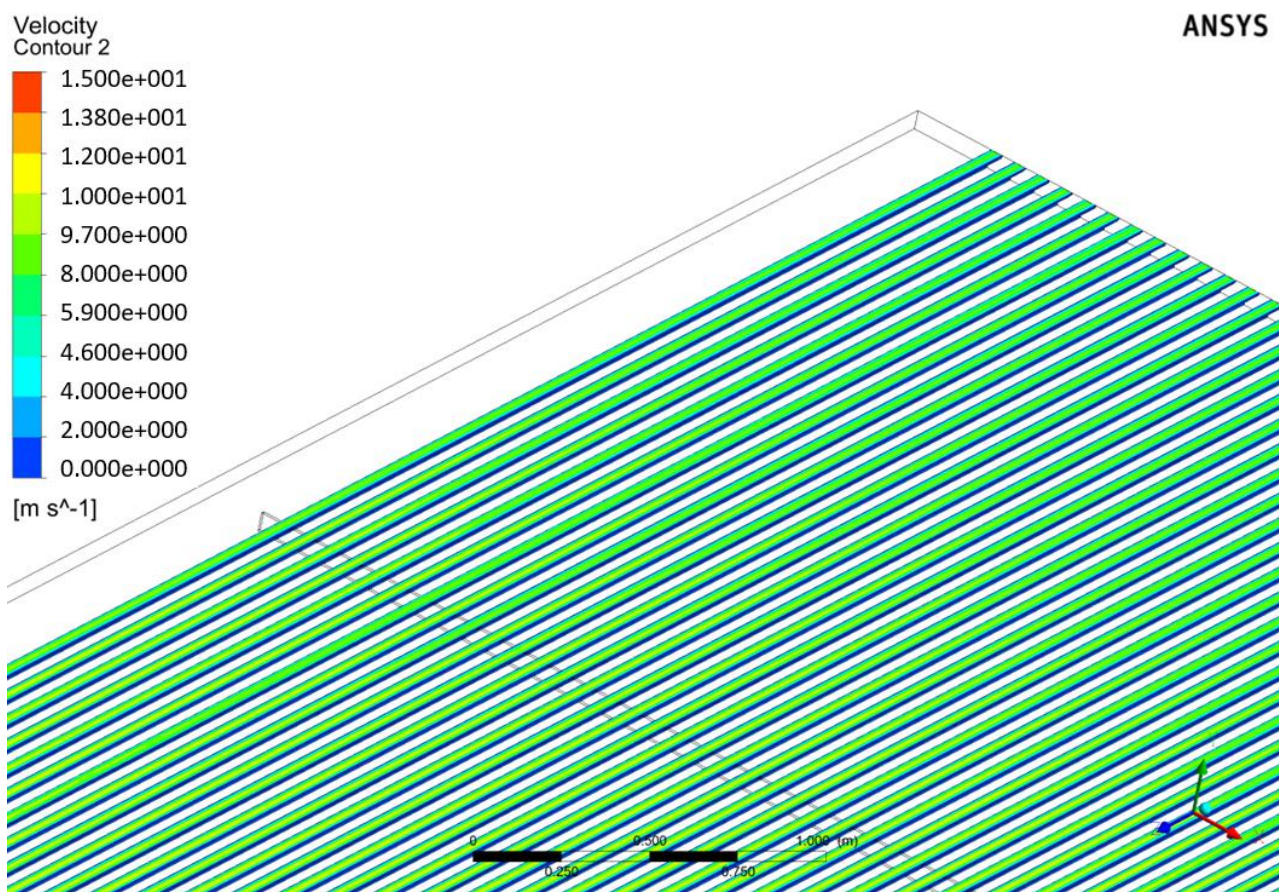


Рисунок 32 – Скорость продуктов сгорания на участке входа в ВЗП

Распределение скорости дымовых газов в области выхода их из ВЗП при работе котла на номинальной теплопроизводительности представлено на рисунке 33, где средняя скорость дымовых газов составила 14 м/с, скорость нагреваемого воздуха 4,62 м/с.

Скорость дымовых газов увеличивается по мере прохождения секций теплообменника ввиду нарастания слоя золовых отложений, которые сужают проходное сечение. На участках покрытых отложениями из дымовых газов стенка прогревается неравномерно, возникают температурные напряжения, которые могут привести к пережогу труб ВЗП и выводу их из строя [113].

Увеличение средней скорости нагреваемого воздуха с 4,62 до 5,2 м/с по мере прохождения секций теплообменника связано с возрастанием количества тепла передаваемого к воздуху.

По данным полученным в результате компьютерного моделирования процесса теплообмена в ВЗП были построены номограммы, связывающие между собой КПД, скорость нагреваемого воздуха, температуру уходящих



дымовых газов и производительность котельного агрегата при фактической работе котла (при наличии отложений из дымовых газов на поверхности ВЗП) (рисунок 34). Красными линиями обозначены постоянные температуры уходящих дымовых газов, синие линии соответствуют постоянным скорости нагреваемого воздуха [101, (с. 92)].

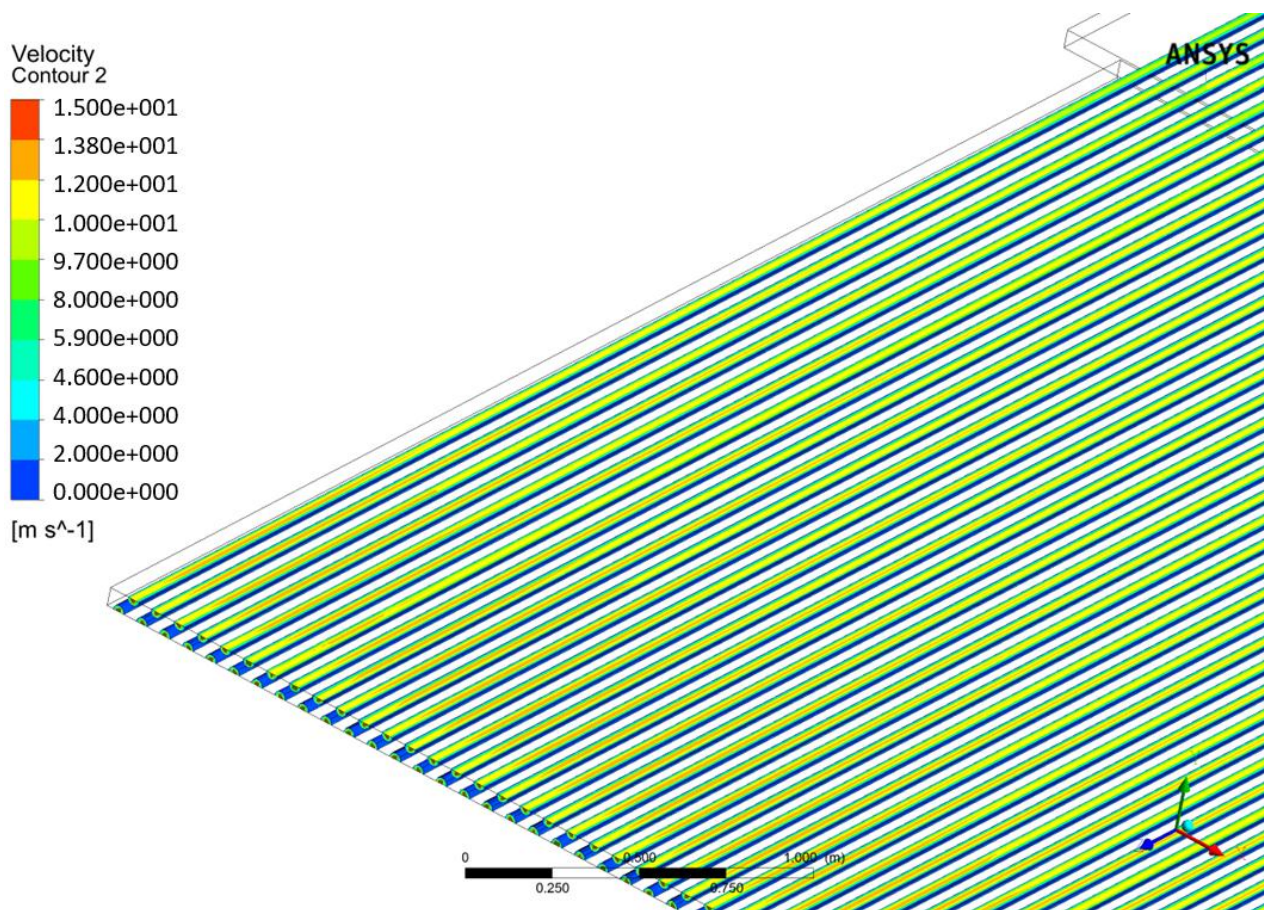


Рисунок 33 – Скорость дымовых газов на участке выхода из ВЗП

Как видно на рисунке 34 при наличии отложений из дымовых газов на поверхности трубок ВЗП максимальный КПД котельного агрегата достигает значения 78,62 %, максимальная температура уходящих дымовых газов 159 °С. Для обеспечения эффективной работы теплообменника исключительно важен минимально достижимый уровень температуры уходящих дымовых газов.

Моделирование процесса теплообмена позволяет спрогнозировать КПД установки при условии отсутствия отложений на поверхности воздухоподогревателя (рисунок 35). Очистка поверхности нагрева ВЗП от отложений позволяет повысить КПД установки до максимального значения 91,5%. Отсутствие отложений на теплообменной поверхности способствует плавному распределению температуры уходящих дымовых газов и скорости нагретого воздуха при изменении теплопроизводительности [101, (с. 92)].

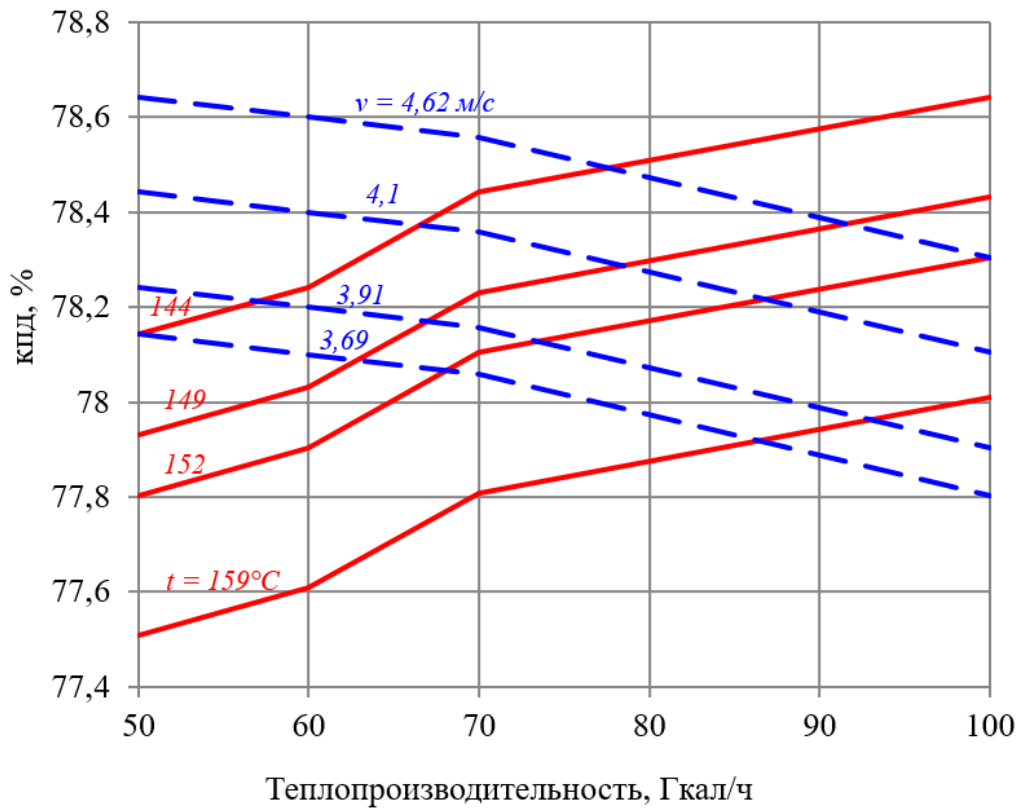


Рисунок 34 – Номограмма определения КПД при наличии отложений на поверхности ВЗП

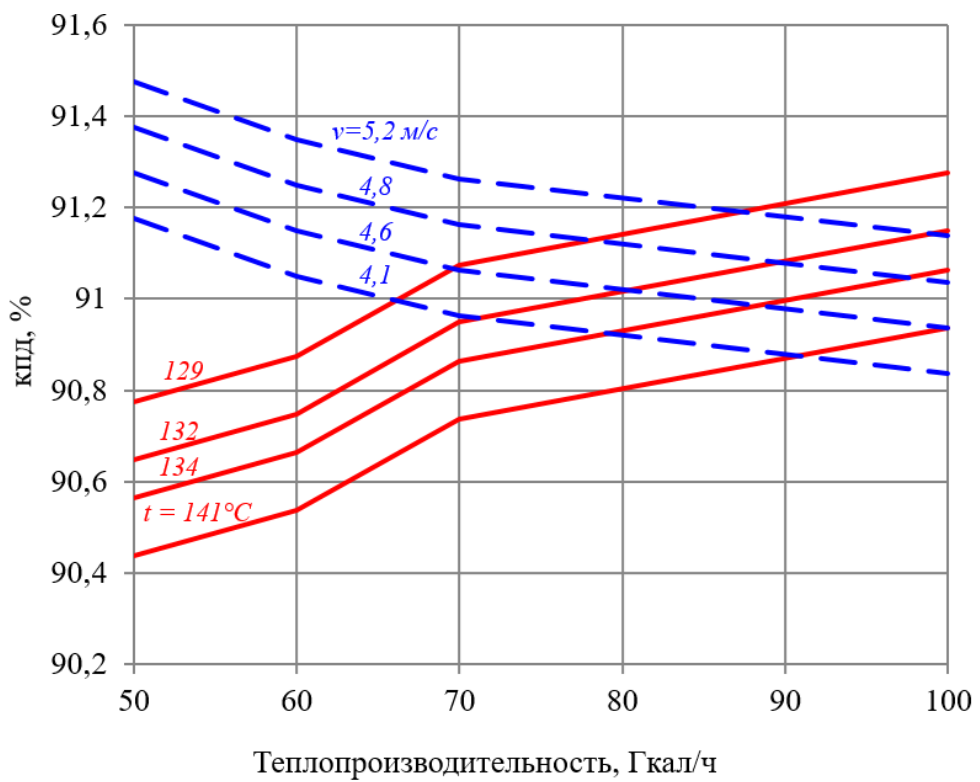


Рисунок 35 – Номограмма определения КПД котла при чистой поверхности ВЗП

Снижение температуры уходящих дымовых газов с 159 °С до 141°С уменьшает теплотери с уходящими дымовыми газами с 12% до 4%. Увеличение скорости воздуха при «чистой» поверхности теплообмена (рисунок 35) свидетельствует о интенсификации процесса теплообмена в ВЗП и возрастании количества теплоты, которое передается нагреваемому воздуху.

Стоит отметить, что в современных котельных агрегатах выдерживается минимальный (критический) КПД равный 80 %. Это тот предельный уровень, при достижении которого дальнейшая эксплуатация агрегата нерентабельна.

### **3.6 Выводы по разделу**

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Разработана компьютерная модель рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя, которая может быть использована для мониторинга состояния поверхности нагрева теплообменника при работе котельных агрегатов на различном топливе. Результаты моделирования хорошо согласуются с имеющимися фактическими данными, относительное отклонение результатов вычислений не превышает 3 %.

2. Модель позволяет:

- получить полную пространственную картину процесса теплообмена в воздухоподогревателе и определить теплофизические величины в любом объеме трубного пучка;

- реализовать различные сценарии работы теплообменника в зависимости от состояния поверхности;

- сократить продолжительность вычислений;

- быстро и точно произвести расчеты при изменении качественного состава топлива или переходе на другие виды топлива, т.е. хорошо применима для расчета ВЗП при работе котла на непроектных топливах.

2. Получены номограммы, позволяющие прогнозировать КПД котельного агрегата в зависимости от теплопроизводительности, скорости нагретого воздуха и температуры уходящих дымовых газов. Уменьшение количества потерь теплоты с уходящими газами и в окружающую среду при чистой поверхности нагрева ВЗП способствует повышению КПД котельного агрегата на 13 %.

Результаты компьютерного моделирования применяются для дальнейшего математического определения коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи в ВЗП.

## 4 УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ХВОСТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ КОТЛА

Настоящий раздел посвящён установлению вышеназванных закономерностей и разработке практических рекомендаций по повышению эффективности работы котельных агрегатов. Основные положения раздела опубликованы в работе [4, 101, 115].

### 4.1 Расчет коэффициентов теплоотдачи теплоносителей

Характерным размером для расчета процесса теплообмена по газовой стороне принимается внутренний диаметр трубы  $d$  с учетом наличия и отсутствия отложений из дымовых газов на стенке труб ВЗП. В воздухоподогревателе имеет место турбулентный и переходный режимы движения потока дымовых газов. Развитый турбулентный режим устанавливается при значениях  $Re > 10^4$ . Для данного режима применима формула [2, 101, 107]:

$$Nu = 0,021Re^{0,8}Pr^{0,43} \left( \frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \epsilon_l \quad (57)$$

Обобщение экспериментальных данных для конвективного теплообмена внутри прямой трубы и числе Рейнольдса в пределах ( $2300 \leq Re < 10^4$ ) представлено в научной литературе следующим критериальным уравнением для расчета коэффициента теплоотдачи  $\alpha_r$  [101, (с. 93)]:

$$Nu = 0,008Re^{0,9}Pr^{0,43} \quad (58)$$

Характерным размером для расчета процесса теплообмена по воздушной стороне принимается внешний диаметр труб  $D$ . Как было отмечено в первом разделе диссертационной работы теплоотдача первого ряда отличается от остальных рядов и определяется начальной турбулентностью потока. Начиная с третьего ряда, турбулентность потока принимает стабильный характер. Средний коэффициент теплоотдачи для третьего и последующих рядов [2]:

$$\bar{\alpha}_B = \frac{\overline{Nu} \times \lambda_B}{D} \quad (59)$$

Для нахождения коэффициента теплоотдачи трубок первого ряда  $\bar{\alpha}_1$  найденный средний коэффициент  $\bar{\alpha}_B$  умножаем на коэффициент 0,6; для трубок второго ряда  $\bar{\alpha}_2$  умножаем на 0,7.

Тогда как средний коэффициент теплоотдачи к воздуху для всего пучка в целом  $\alpha_B$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) рассчитывается по формуле:



$$\alpha_B = \frac{[(\bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + (z - 2) \cdot \bar{\alpha}_B)]}{z} \quad (60)$$

где  $z$  – число рядов.

При поперечном обтекании шахматного пучка труб для воздуха расчетные формулы упрощаются и принимают вид) [101, (с. 93)]:

$$\overline{Nu} = 0,35Re_{ж}^{0,6} \quad (61)$$

На основании результатов компьютерного моделирования по полученным значениям температуры и скорости теплоносителей в воздухоподогревателе котла, работающего на непроектном топливе получена номограмма, связывающая между собой числа Рейнольдса и Нуссельта теплоносителей (воздуха и дымовых газов) в трех температурных областях воздухоподогревателя (рисунок 36) [101, (с. 93)].

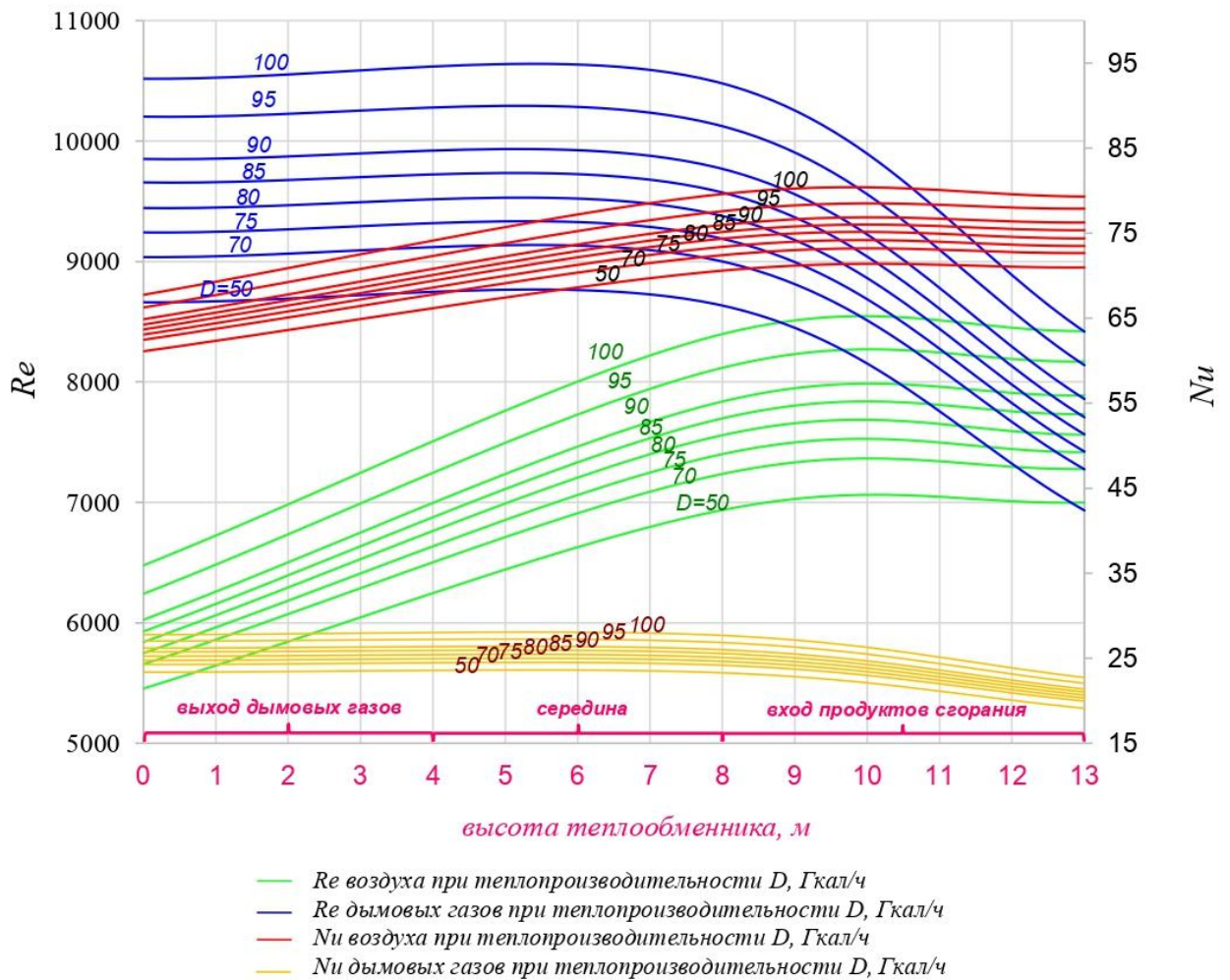


Рисунок 36 – Критерии  $Re$  и  $Nu$  теплоносителей

При работе котла на номинальной теплопроизводительности согласно номограмме (рисунок 36) на входе продуктов сгорания в теплообменник число Рейнольдса составляло 8500. По мере прохождения газов ввиду сужения проходного сечения возрастает скорость потока, число Рейнольдса достигает 10500 на выходе из ВЗП. Среднее значение числа Рейнольдса для дымовых газов в теплообменнике составит порядка 9500. Развитый турбулентный режим движения дымовых газов наблюдается лишь в средне и низко-температурных областях ВЗП при работе котла на мощности  $95 \div 100$  Гкал/ч, критическая длина трубки для полностью развитого потока находится на уровне  $0 \div 9$  метров по высоте теплообменника. При работе котла на мощности ниже 95 Гкал/ч режим движения дымовых газов в трубках переходный. Таким образом использование вышеупомянутых формул корректно для нахождения числа Нуссельта в ВЗП дымовых газов. Число Нуссельта дымовых газов на входе в ВЗП 22, на выходе 27, среднее значение числа Нуссельта для дымовых газов в ВЗП 24,5.

По мере прохождения теплообменника воздух прогревается, растет его температура и скорость. Числа Рейнольдса и Нуссельта воздуха достигают максимальных значений на высоте  $8 \div 13$  метров. При работе котла на номинальной теплопроизводительности согласно номограмме (рисунок 36) число Рейнольдса для нагреваемого воздуха меняется от минимального 6500 значения до максимального 8500. Число Нуссельта нагреваемого воздуха меняется от минимального значения 70 на входе в теплообменник до максимального значения в области выхода нагретого воздуха 79, среднее значение числа Нуссельта для воздуха в ВЗП 74,5.

Влияние изменения коэффициентов теплоотдачи на общий коэффициент теплопередачи в воздухоподогревателе подробно изложено в следующем подразделе.

#### **4.2 Установление влияния загрязнений на работоспособность низкотемпературных конвективных поверхностей нагрева**

Интенсификация золового заноса и образование связанных отложений происходит при появлении на поверхностях нагрева влаги вследствие конденсации серной кислоты как продукта взаимодействия  $SO_3$  с водяными парами [116, 117]. Именно сернокислотная точка росы  $t_p^{H_2SO_4}$  характеризует границу качественного и количественного изменений золового загрязнения поверхности [3, (с. 63 – 67)]. Температура росы серной кислоты определяется содержанием в топливе серы, золы, составом золы, коэффициентом избытка воздуха, при котором осуществляется горение и для угля Каражыра составляет  $76^\circ C$  [109].

На рисунке 37 приведены обобщенные зависимости по влиянию низкотемпературных золовых отложений на работоспособность поверхности нагрева без очистки при пылевом сжигании любых твердых топлив [101, (с. 85)]. Коэффициент загрязнения поверхности  $\varepsilon$  представлен в зависимости от разницы температуры стенки  $t_{ст}$  и температуры росы серной кислоты  $t_p^{H_2SO_4}$ .

На количество выпадающего конденсата раствора серной кислоты и паров воды влияет температура теплообменной поверхности. Опыт предыдущих исследований [3, (с. 57 – 67)] показывает, что для предотвращения образования связанных отложений на низкотемпературных поверхностях нагрева котла следует обеспечить условия ее работы с температурами стенки  $t_{ст} > (t_p^{H_2SO_4} + 10)^\circ\text{C}$ . Компьютерное моделирование процесса теплообмена в ВЗП позволило получить полное пространственное распределение температур теплоносителей и рассчитать температуру стенки, как среднеарифметическое температуры газов и нагреваемого воздуха [101, (с. 85)].

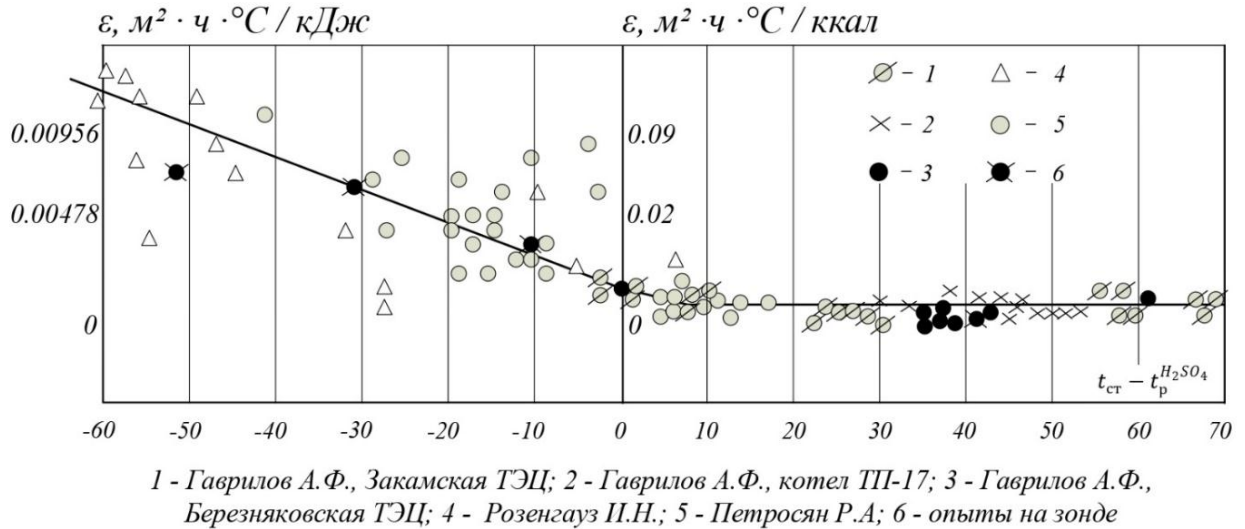


Рисунок 37 – Коэффициент загрязнения в зависимости от разности температур стенки и росы серной кислоты

В области входа продуктов сгорания в ВЗП температура стенки труб гораздо выше температуры росы серной кислоты  $t_{ст} \gg (t_p^{H_2SO_4} + 10)^\circ\text{C}$ . В этой зоне образуются лишь сыпучие отложения, которые легко уносятся высокими скоростями газового потока. В связи с этим, поверхность теплообменника в области входа продуктов сгорания в ВЗП (участок на высоте  $13 \div 8$  м) остается практически чистой.

Для области  $t_{ст} < (t_p^{H_2SO_4} + 10)^\circ\text{C}$  (средняя и нижняя части ВЗП) коэффициент загрязнения шахматных пучков при сжигании твердых топлив,  $\varepsilon, \frac{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}}{\text{ккал}}$  оценивается согласно [3, (с. 68 – 69)]:

$$\varepsilon = 0,005 - 0,0007(t_{ст} - t_p^{H_2SO_4}) \quad (62)$$

В области выхода дымовых газов из ВЗП (участок на высоте  $4 \div 0$  м) температура стенки  $t_{ст}$  достигает своего минимального значения что крайне важно и определяется по формуле [3, 118]:

$$t_{\text{СТ}}^{\text{МИН}} = \frac{0,8\alpha_{\text{К}}^{\text{Г}}t_{\text{ВЫХ}}^{\text{Г}} + \alpha_{\text{К}}^{\text{В}}t_{\text{ВХОД}}^{\text{В}}}{0,95\alpha_{\text{К}}^{\text{Г}} + \alpha_{\text{К}}^{\text{В}}} \quad (63)$$

где  $\alpha_{\text{К}}^{\text{Г}}$  и  $\alpha_{\text{К}}^{\text{В}}$  – коэффициенты теплоотдачи от газов к стенке и от стенки к воздуху, Вт/м<sup>2</sup>К;

$t_{\text{ВЫХ}}^{\text{Г}}$  и  $t_{\text{ВХОД}}^{\text{В}}$  – температура уходящих дымовых газов после ВЗП и температура холодного воздуха на входе в ВЗП, °С;

0,8 и 0,95 – коэффициенты, учитывающие загрязнение поверхности ВЗП.

В этой области для предотвращения коррозии металла труб ВЗП необходимо поддерживать температуру стенки труб  $t_{\text{СТ}}^{\text{МИН}}$  выше температуры точки росы продуктов сгорания  $t_{\text{р}}^{\text{РС}}$ , что для угля Каражыра, как низкосернистого, составляет  $t_{\text{р}}^{\text{РС}} = 55$  °С. Отложения этой зоны плотно связываются с поверхностью ВЗП, их удельная термическая проводимость существенно ниже проводимости стенок труб, что приводит к падению коэффициента теплопередачи в теплообменнике.

По разности температуры стенки и температуры точки росы паров серной кислоты определялся коэффициент загрязнения поверхности  $\varepsilon$ . Найденный коэффициент загрязнения поверхности позволяет определить толщину загрязнений  $\delta_3$ , (м).

Коэффициент загрязнения поверхности  $\varepsilon$ ,  $\frac{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}}{\text{ккал}}$ , представляет собой отношение толщины слоя отложений  $\delta_3$ , (м) к коэффициенту теплопроводности слоя отложений  $\lambda_3$  ( $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{°С}}$ ) [119]:

$$\varepsilon = \frac{\delta_3}{\lambda_3} \quad (64)$$

Откуда толщина золы определяется как:

$$\delta_3 = \varepsilon \cdot \lambda_3. \quad (65)$$

На основании полученных данных была разработана номограмма распределения толщины отложений и коэффициента теплопередачи по высоте воздухоподогревателя (рисунок 38) [101].

На рисунке 38 теплообменник разделен по высоте на три области: вход продуктов сгорания в ВЗП, середина и выход дымовых газов из ВЗП.

В области *входа продуктов сгорания* за счет высокого значения температуры стенки, нагреваемой горячим потоком газа образуется незначительное количество отложений, что соответствует высокому коэффициенту теплопередачи на этом участке.

В *средней части* воздухоподогревателя снижение температуры стенки приводит к увеличению конденсации паров серной кислоты. Дополнительное смачивание поверхности золовых частиц способствует лучшему налипанию их

на стенку трубок, в результате чего в данной температурной зоне начинается процесс образования отложений, прочно связанных с поверхностью. Повышение количества отложений приводит к снижению коэффициента теплопередачи на данном участке [101, (с. 94)].

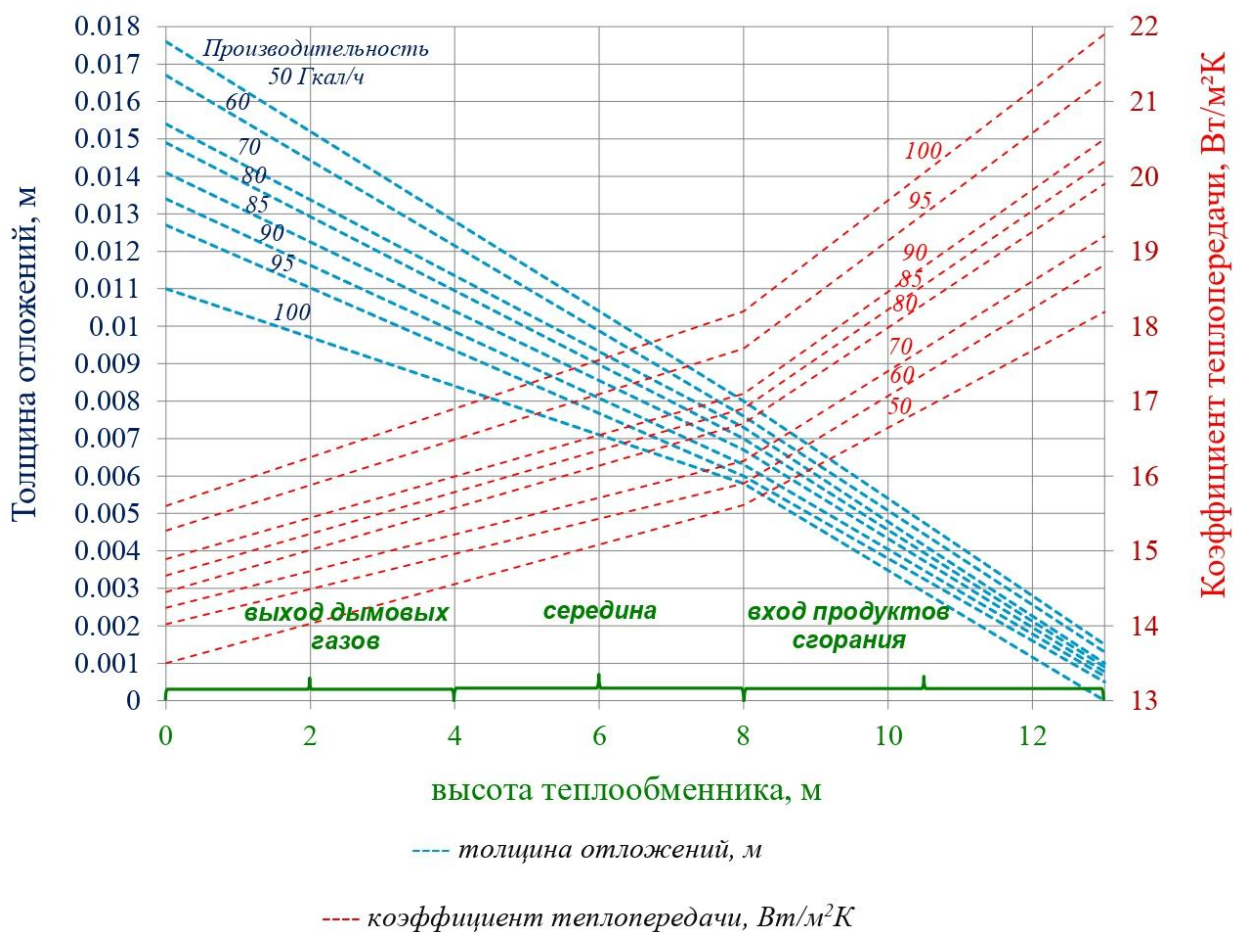


Рисунок 38 – Полная пространственная картина процесса теплообмена в ВЗП

В области *выхода дымовых газов из ВЗП* слой отложений крепчает, происходит его «цементирование» и нарастание вплоть до критических значений, что приводит к падению коэффициента теплопередачи до минимальных значений.

Анализ номограммы, связывающей между собой числа Рейнольдса и Нуссельта теплоносителей (рисунок 36) и пространственной картины теплообмена в трех температурных областях воздухоподогревателя (рисунок 38) позволяет сделать следующий вывод: по мере прохождения продуктов сгорания в теплообменнике сечение для прохода газов сужается из-за скапливания и роста отложений на поверхности трубок, скорость потока возрастает. Увеличение скорости потока газов способствует возрастанию его турбулентности на выходе из теплообменника, увеличению чисел Рейнольдса и Нуссельта, что приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи от дымовых газов к поверхности теплообмена. Однако, коэффициент теплопроводности загрязнений гораздо ниже коэффициента теплопроводности стенки труб, в

результате чего на участках покрытых отложениями из дымовых газов создается дополнительный слой термического сопротивления теплопередачи, коэффициент теплопередачи уменьшается, а соответственно снижается интенсивность передача тепла к воздуху [101, (с. 94)].

Для номинальной теплопроизводительности согласно номограмме, на рисунке 38 коэффициент теплопередачи меняется от минимального 15,5 до максимального значения 22 Вт/(м<sup>2</sup>·К), средний коэффициент теплопередачи в ВЗП составит порядка 19 Вт/(м<sup>2</sup>·К). При снижении нагрузки котла, вследствие снижения объема дымовых газов будет происходить более быстрое уменьшение температуры стенки теплообменника, и как следствие смещение зон образования отложений. Наибольшее количество отложений и как следствие, минимальное значение коэффициента теплопередачи в ВЗП соответствует теплопроизводительности 50 Гкал/ч.

Таким образом, построенные номограммы работы ВЗП в зависимости от состояния поверхности теплообмена позволяют судить о влиянии загрязнений на эффективность работы теплообменника.

В таблице 7 представлены данные средней толщины отложений по высоте теплообменника в зависимости от времени работы котельного агрегата на номинальной теплопроизводительности.

Таблица 7 – Средняя толщина отложений по времени работы котла на номинальной теплопроизводительности

Время работы котла, сутки	Средняя толщина отложений, м
4	0,005
8	0,0055
12	0,0059
16	0,0066
20	0,007
24	0,0075
28	0,0083
32	0,0095
36	0,01

На основании данных таблицы 7 построен график зависимости КПД котла от роста отложений на поверхности воздухоподогревателя с течением времени (рисунок 39). С учетом минимально допустимого КПД современных котельных агрегатов получена точка перегиба на кривой  $\eta$ , обозначенная «А», которая соответствует критической толщине отложений 0,0089 м. Эксплуатация котельного агрегата при толщине отложений выше значения соответствующего точке «А» нецелесообразна [101, (с. 95)].



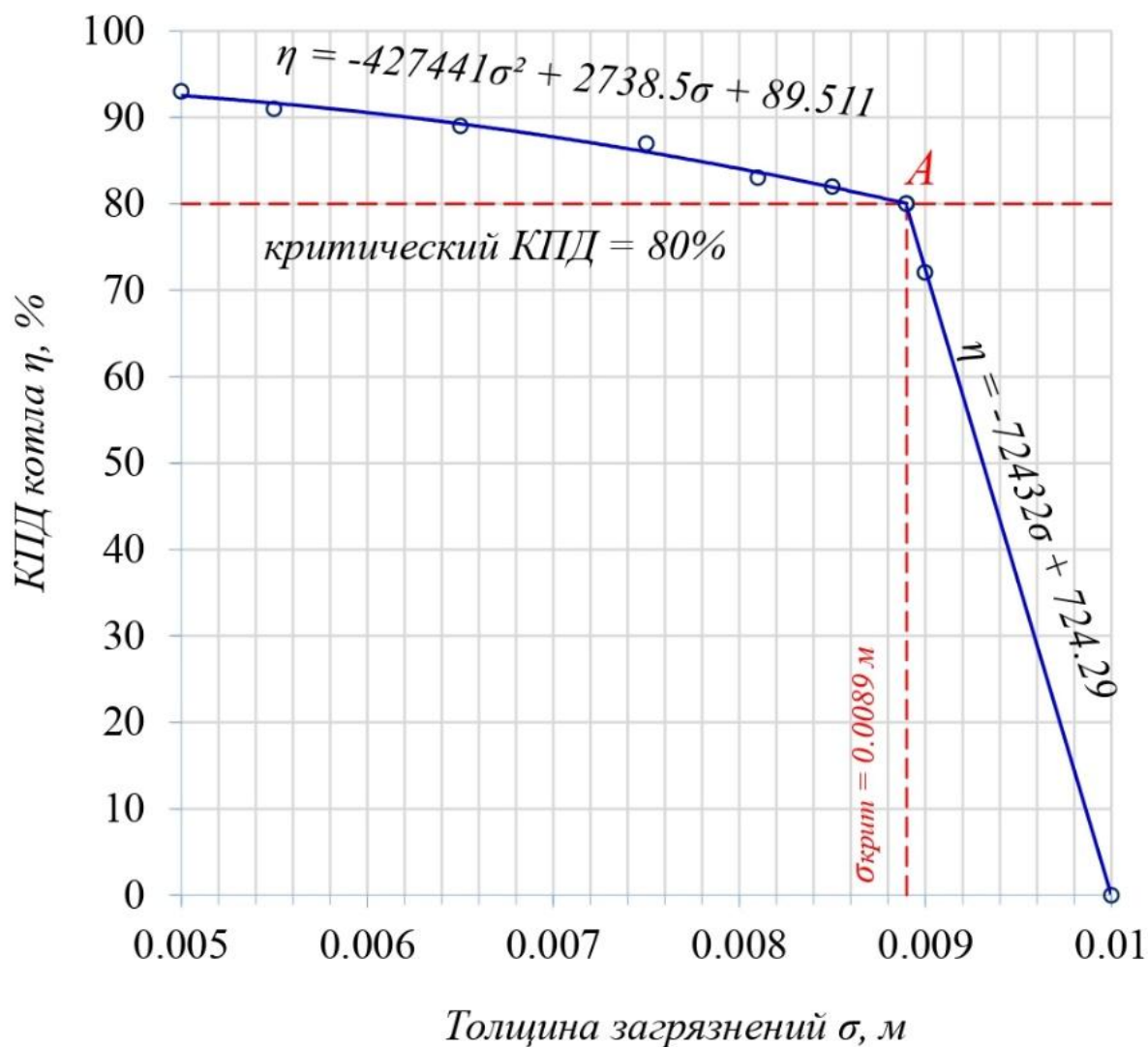


Рисунок 39 – Зависимость КПД котельного агрегата от толщины загрязнений

Снижение КПД котла с течением времени до критического значения в точке «А» имеет квадратичную зависимость и описывается уравнением:

$$\eta = -427441\sigma^2 + 2738,5\sigma + 89,511 \quad (66)$$

При толщине отложений выше значения соответствующего точке «А» происходит резкое линейное снижение КПД котельного агрегата:

$$\eta = -72432\sigma + 724,29 \quad (67)$$

Критическая толщина отложений находится в пределах  $0,0083 \div 0,0095$  м (таблица 7). Путем интерполирования данных соответствующих образованию указанных пределов толщин отложений было определено время образования критической толщины отложений. Толщина слоя отложений на поверхности трубок воздухоподогревателя достигает критического значения  $0,0089$  м спустя 30 суток работы котельного агрегата [101, (с. 95)].

Аналогично предыдущему графику был построен график зависимости температуры уходящих дымовых газов от толщины слоя отложений (рисунок 40).

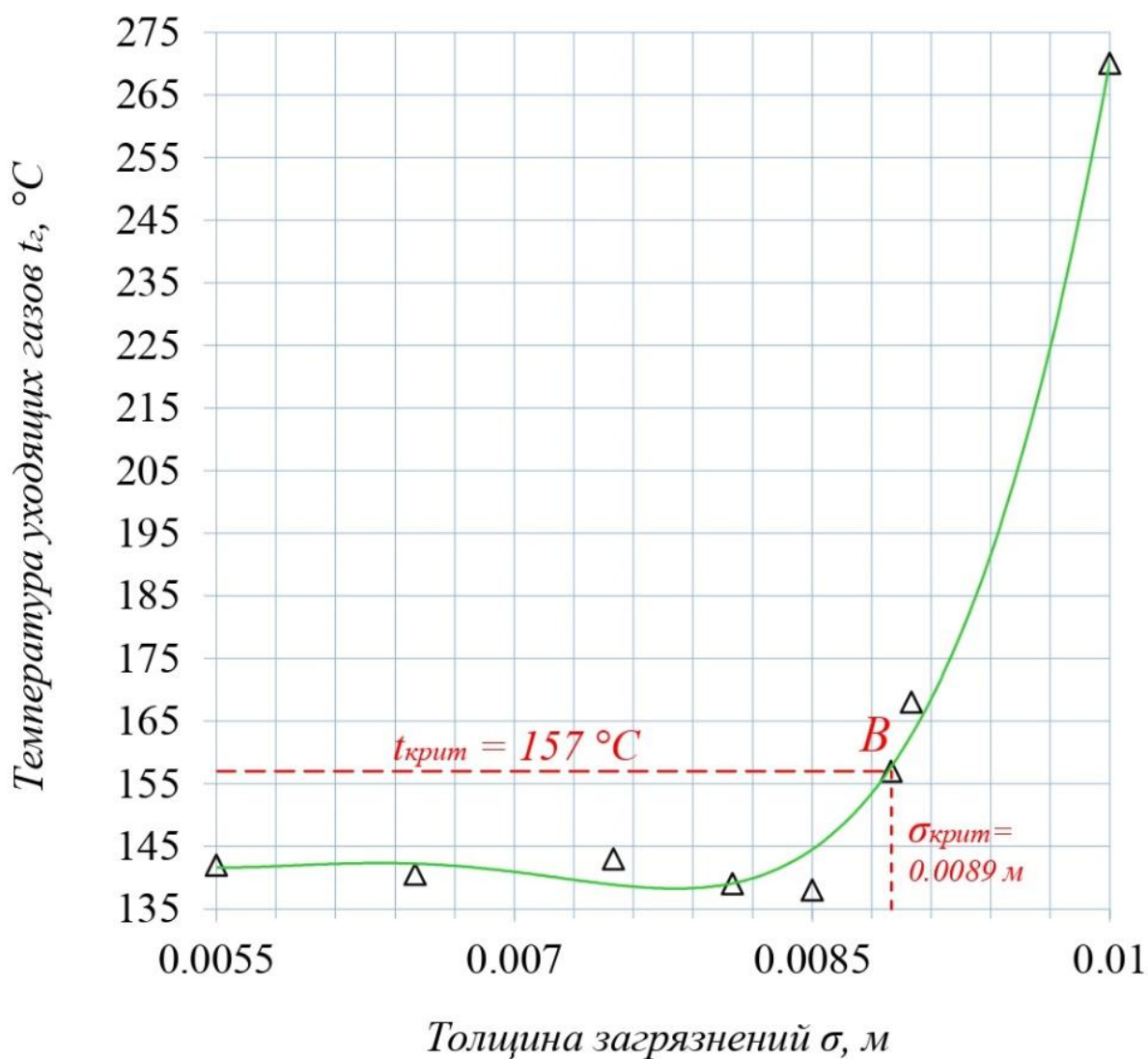


Рисунок 40 – Зависимость температуры уходящих газов от толщины загрязнений

На графике точка «Б» соответствует критической толщине отложений 0,0089 м. Температура уходящих дымовых газов соответствующая точке «Б» составила 157 °C. Исходя из вышеизложенного следует вывод, что эксплуатация котельного агрегата с температурой уходящих дымовых газов на выходе из воздухоподогревателя не превышающей критическое значение 157 °C может проводиться без останова котла на очистку от отложений. Расчет аэродинамического сопротивления ВЗП проводился согласно [115, 120, 121].



### 4.3 Расчет аэродинамического сопротивления воздухоподогревателя водогрейного котла

Сопротивление воздухоподогревателя  $\Delta h_{\text{ВЗП}}$ , Па [115, 120, 121], складывается из сопротивления трения в трубах  $\Delta h_{\text{тр}}$  и сопротивления входа в трубы и выхода из них  $\Delta h_{\text{изм}}$ :

$$\Delta h_{\text{ВЗП}} = \Delta h_{\text{тр}} + \Delta h_{\text{изм}} \quad (68)$$

Ширина воздухоподогревателя определяется по формуле:

$$B = (z_1 + 1) \cdot S_1 \quad (69)$$

Длина воздухоподогревателя определяется по формуле:

$$l = (z_2 + 1) \cdot S_2 \quad (70)$$

Площадь живого сечения для прохода газов равна:

$$F = \frac{\pi \cdot (D - 2\sigma_{\text{ст}})^2}{4} \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (71)$$

Сопротивление трения в трубах  $\Delta h$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta h_{\text{тр}} = \Delta h'_{\text{тр}} \cdot C_{\text{ш}} \cdot l \quad (72)$$

где  $\Delta h'_{\text{тр}}$  – зависит от средней температуры потока и его скорости;  
 $C_{\text{ш}}$  – поправочный коэффициент на шероховатость.

Сопротивление при входе в трубы и при выходе из них вычисляется по формуле [107, 108, 109]:

$$\Delta h_{\text{изм}} = m \cdot (\xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}}) \cdot \frac{\rho w^2}{2} \quad (73)$$

где  $m$  – количество последовательно расположенных по ходу газа отдельных кубов,  $m = 1$ ;

$\xi_{\text{вх}}$  и  $\xi_{\text{вых}}$  – коэффициенты входа и выхода определяются в зависимости от отношения суммарной площади живого сечения труб к площади живого сечения газохода до и после воздухоподогревателя.

Коэффициент сопротивления при резком расширении прямого канала определяется в зависимости от отношения меньшего сечения к большему [115, 120, 121]:

$$\frac{F_M}{F_G} = \frac{\pi \cdot (D - 2\sigma_{ст})^2}{4Bl} \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (74)$$

При  $\frac{F_M}{F_G} = 0,418$  коэффициенты местного сопротивления при входе и выходе дымовых газов в трубки воздухоподогревателя равны соответственно  $\xi_{вх} = 0,76$  и  $\xi_{вых} = 1,38$ .

Результаты расчета аэродинамического сопротивления ВЗП в зависимости от состояния теплообменной поверхности (наличия и отсутствия отложений из продуктов сгорания) представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты расчета аэродинамического сопротивления ВЗП в зависимости от состояния теплообменной поверхности

Параметры	Значение
1	2
Ширина воздухоподогревателя $B$ , м	7,98
Длина воздухоподогревателя $l$ , м	3,444
Площадь живого сечения для прохода газов $F$ , м <sup>2</sup>	11,49
Коэффициент сопротивления трения в трубах $\Delta h'_{тр}$ для загрязненной поверхности, мм. вод. ст.	9,8
Коэффициент сопротивления трения в трубах $\Delta h'_{тр}$ для чистой поверхности, мм. вод. ст.	4,5
Поправочный коэффициент на шероховатость $C_{ш}$ при загрязненной поверхности	0,98
Поправочный коэффициент на шероховатость $C_{ш}$ при чистой поверхности	0,4
Сопротивление трения в трубах $\Delta h_{тр}$ , Па при загрязненной поверхности	199,99
Сопротивление трения в трубах $\Delta h_{тр}$ , Па при чистой поверхности	37,48
Сопротивление при входе в трубы и при выходе из них $\Delta h_{изм}$ , Па при загрязненной поверхности	129,4

Продолжение таблицы 8

1	2
Соппротивление при входе в трубы и при выходе из них $\Delta h_{\text{изм}}$ , Па при чистой поверхности	95,07
Отношения меньшего сечения канала к большему $\frac{F_M}{F_6}$	0,418
Соппротивление воздухоподогревателя при загрязненной поверхности $\Delta h_{\text{ВЗП}}$ , Па	329,39
Соппротивление воздухоподогревателя при чистой поверхности $\Delta h_{\text{ВЗП}}$ , Па	132,55

Согласно полученным данным сопротивление ВЗП при наличии загрязнений в 2,5 раза превышает значения при чистой поверхности теплообмена.

Для того, чтобы уменьшить аэродинамическое сопротивление воздухоподогревателя водогрейного котла на основании рассмотренных в предыдущих разделах диссертации современных способов очистки поверхностей нагрева в имеющихся условиях в качестве регулярной очистки ВЗП от отложений рекомендуются применение газовой обдувки непосредственно во время эксплуатации котельного агрегата КВ-Т-116,3-150. Это позволит увеличить продолжительность непрерывной и бесперебойной работы теплообменника, снизить экономические затраты на его ремонт и обслуживание.

Необходимо отметить, что обдувка ВЗП котла от отложений должна проводиться согласно производственной инструкции. Обдувку сжатым воздухом следует проводить по возможности при сниженной нагрузке котельного агрегата, при увеличенном разрежении в топке до  $50 \div 70$  Па и в определенной последовательности (по ходу газов): сначала обдувать поверхности нагрева, расположенные в топке, затем конвективную часть и воздухоподогреватель [57, 58].

Очищение поверхностей нагрева котельного агрегата методом газовой обдувки требует строгого соблюдения правил техники безопасности. Следует стремиться к предотвращению возникновения опасных ситуаций, носить защитные очки и рукавицы, оберегать себя от возможных ожогов и повреждений при выбросе из люков золы и дымовых газов (обдувщик должен стоять в стороне от дверок). Все сотрудники, эксплуатирующие котельный агрегат должны заблаговременно поставлены в известность о предстоящей обдувке. Запрещается проводить обдувку поверхностей нагрева при возникновении неисправностей агрегата или обдувочных аппаратов, выбивании продуктов сгорания через трещины или неплотности обмуровки.

#### 4.4 Выводы по разделу

Для того, чтобы не произошло снижение коэффициента теплопередачи в ВЗП из-за увеличения слоя крепко связанных с поверхностью отложений

(имеющего низкое значение термической проводимости), на поверхности стенки труб необходимо поддерживать температуру превышающей на 10 градусов температуры точки росы паров серной кислоты для соответствующей марки угля. Для угля разреза Каражыра температура точки росы паров серной кислоты равна 76 °С, таким образом, для предотвращения «сцементированных» с поверхностью трубок отложений рекомендуется выдерживать температуру стенки выше 86 °С.

Анализ полученных данных показал, с течением времени толщина отложений монотонно растет, достигая критического значения 0,0089 м спустя месяц работы котла. Это приводит к полному забиванию трубок золой в области выхода дымовых газов из ВЗП и необходимости останова агрегата на очистку. По результатам проведенного анализа было выявлено, что загрязнение поверхности теплообмена воздухоподогревателя котельного агрегата спустя месяц эксплуатации агрегата увеличивает аэродинамическое сопротивление воздухоподогревателя в 2,5 раза в сравнении с начальным сопротивлением.

Проведенные исследования дали возможность получить полную пространственную картину теплообмена в ВЗП котла, работающего на непроектном топливе угле разреза Каражыра. Установлены механизм образования отложений и закономерности передачи теплоты в трех температурных зонах воздухоподогревателя при работе котла на непроектном топливе. Показано, что эксплуатация котельного агрегата может быть проведена без останова на очистку при температуре, не превышающей 157 °С. Число очисток воздухоподогревателя сократится, так как необходимость в них будет определяться достижением критического значения температуры уходящих дымовых газов. Знание критического значения температуры газов на выходе из ВЗП оптимизирует работу котла, увеличивая продолжительность его бесперебойной работы, тем самым увеличивая годовое число часов работы агрегата.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными задачами исследования проведено комплексное теоретическое и экспериментальное изучение процессов теплообмена в воздухоподогревателе (ВЗП) с учетом золовых отложений из дымовых газов на теплообменных трубах. Основные результаты исследования включают следующие положения:

1 Выполнены дистанционные измерения температуры факела в топке водогрейного котла КВ-Т-116,3-150, работающего на каменном угле марки Д разреза Каражыра, для определения влияния параметров процесса горения на теплообмен в ВЗП. В результате проведенных исследований установлено, что на уровне горелок по всем сторонам топочной камеры при теплопроизводительности котла ниже 80 Гкал/ч расхождение температуры продуктов сгорания незначительное. Наибольшее расхождение температуры продуктов сгорания наблюдается при работе котла на мощности свыше 80 Гкал/ч и составляет по фронтальной стенке 30 °С, по боковым сторонам 6 °С. Соответственно при работе котла на высокой мощности возникают температурные перекосы факела продуктов сгорания, что может привести к уносу несгоревших в топке частиц топлива и их догоранию в опускном газоходе и как следствие повреждению ВЗП.

На основе анализа построенных изотерм топки определены режимные условия работы топки, обеспечивающие отсутствие шлакования радиационных поверхностей нагрева, надежную циркуляцию в котле и минимальные потери теплоты, которые необходимы для повышения КПД котла и оптимизации параметров дымовых газов на входе в ВЗП. **Оптимальным является режим работы котла при теплопроизводительности свыше 80 Гкал/ч.** Температура продуктов сгорания на выходе из топки при теплопроизводительности котла 50 ÷ 100 Гкал/ч не превышает 1100 °С.

2 Экспериментально определена с использованием термографического и контактного метода измерений степень черноты загрязненной и очищенной поверхностей труб ВЗП, которая составила 0,94 и 0,91 соответственно. Это позволило получить достоверные термограммы рабочих поверхностей ВЗП, свидетельствующие о существенном влиянии золоотложений на работу котельного агрегата.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены температуры продуктов сгорания в топочном пространстве и на выходе из него, температуры стенки трубок и золовых отложений на поверхности воздухоподогревателя, которые в дальнейшем использовались в качестве исходных данных для моделирования процессов теплообмена в конвективных поверхностях нагрева и верификации разработанной компьютерной модели.

3 Разработана в программном комплексе Ansys Fluent трёхмерная теплофизическая модель рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя котельного агрегата которая позволяет:

- определить эффективность его работы с учетом зашлаковывания его теплообменных поверхностей на различных видах топлива;

- получить пространственную картину развития процессов теплообмена и изменения гидравлического сопротивления в зависимости от основных факторов: вида топлива, теплопроизводительности котла, интенсивности шлакования теплообменной поверхности, времени работы котла и др.);

- реализовать различные сценарии работы ВЗП в зависимости от его конструкции и состояния теплообменной поверхности труб;

- сократить продолжительность вычислений.

Результаты вычислений разработанной компьютерной модели рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя хорошо согласуются с имеющимися фактическими данными, относительное отклонение результатов вычислений не превышает 3 %.

4 По результатам компьютерного моделирования были разработаны режимные карты эксплуатации ВЗП в виде номограмм и графиков, обеспечивающих его оптимальную работу при высоких значениях коэффициента полезного действия котла. Номограммы свидетельствуют об уменьшении количества потерь теплоты с уходящими газами и в окружающую среду после очистки теплообменной поверхности ВЗП, что способствует повышению КПД котла на 13 % при работе агрегата на номинальной теплопроизводительности.

5 Для предотвращения «сцементированных» с поверхностью трубок отложений рекомендуется выдерживать температуру стенки выше 86 °С. По результатам проведенного анализа было выявлено, что загрязнение поверхности теплообмена воздухоподогревателя котельного агрегата спустя месяц эксплуатации агрегата увеличивает аэродинамическое сопротивление воздухоподогревателя в 2,5 раза в сравнении с сопротивлением при чистой поверхности теплообмена.

Установлена предельно допустимая температура уходящих дымовых газов равная 157 °С, которая регламентирует оптимальную работу воздухоподогревателя.

#### **Оценка полноты решения поставленных задач**

Поставленная цель диссертационного исследования достигнута, задачи полностью решены. Намеченные экспериментальные работы на действующем котельном агрегате КВ-Т-116,3-150 города Семей выполнены, разработана корректная компьютерная модель воздухоподогревателя котла, которая защищена авторским правом, анализ полученных результатов проведен совместно с научными консультантами и коллегами.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы**

Практическая значимость результатов диссертационного исследования подтверждена их внедрением и применением на производстве, при эксплуатации котельного агрегата КВ-Т-116,3-150 ТЭЦ-1 города Семей и в учебном процессе НАО «Университет имени Шакарима города Семей». Кроме того, полученные в работе результаты, могут быть применены в практической деятельности энергетических предприятий для совершенствования работы других котельных агрегатов.

### **Оценка научного уровня диссертационной работы**

Высокий уровень выполненной работы обеспечивается тем, что результаты получены с применением хорошо апробированных методик исследований процессов теплообмена на ТЭЦ-1 города Семей и в специализированных лабораториях Филиала «Института атомной энергии» Национального ядерного центра РК. Литературный обзор, представленный в материалах диссертационной работы охватывает современные работы ученых ведущих стран мира. Результаты диссертационной работы опубликованы в рейтинговых зарубежных журналах, рецензируемых базами данных Scopus и Web of Science, апробированы на международных конференциях, проведенных в Российской Федерации и Республике Казахстан.

Автор выражает благодарность:

- научным консультантам к.т.н., доценту Степановой О.А. и д.т.н., профессору Елистратову С.Л. за помощь и поддержку при подготовке диссертационной работы, постоянное внимание и обсуждение полученных результатов;

- коллективу кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика» НАО «Университет имени Шакарима города Семей» за ценные советы и рекомендации, высказанные в процессе проведения диссертационного исследования;

- сотрудникам «Лаборатории экспериментальной теплофизики» Института атомной энергии Национального ядерного центра РК за помощь и консультации.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Хажидинова А.Р., Степанова О.А., Паримбеков З.А., Хажидинов А.С. Исследование конвективного теплообмена в пучке труб воздухоподогревателя котельного агрегата // Вестник ГУ имени Шакарима города Семей. – Семей, 2019. – №4 (88). – С. 165-168.
- 2 Михеев М. А., Михеева И. М. Основы Теплопередачи. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
- 3 Гаврилов А.Ф., Малкин Б.М. Загрязнение и очистка поверхностей нагрева котельных установок. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
- 4 Хажидинова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Хажидинов А.С. Анализ влияния загрязненности воздухоподогревателя на эффективность работы котлоагрегата // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: матер. 11-й междунар. науч. конф. – Караганда: Изд-во КарГУ им. академ. Е.А. Букетова, 2019. – С. 299 - 302.
- 5 Khazhidinova A.R., Stepanova O.A., Yermolenko M.V., Elistratov S.L., Baibalinova M.Ye. The study of heat transfer processes in the tail heating surfaces of the hot water boiler // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – 2018. – Vol.9. – P. 964–975.
- 6 Надырова А.Р., Мартынова Н.М., Ермоленко М.В. Ресурсоэффективные технологии в энергетике // Матер. V междунар. молод. Форума «Интеллектуальные энергосистемы». – Томск, 2017. – С. 270-273.
- 7 Надырова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В. Межотраслевые связи в инженерии // Матер. междунар. научн. - практ. конф., «Проблемы обеспечения продовольственной безопасности Казахстана в условиях глобализации», посв. 60 - летию д.т.н., проф. Амирханова К. Ж. – Семей, 2017. – С. 299 – 301.
- 8 Надырова А.Р., Степанова О.А., Елистратов С.Л. Изучение процессов теплообмена в теплоэнергетическом оборудовании с помощью моделирования // Матер. междунар. научн. – практ. конф. «Научные достижения и открытия современной молодёжи». – Пенза, 2017 г. – С. 245-248.
- 9 Надырова А.Р., Степанова О.А., Елистратов С.Л. Влияние условий эксплуатации котельного агрегата на степень нагрева теплообменных поверхностей // Вестник НЯЦ РК. – 2017. – № 3(71). – С. 94 - 97.
- 10 Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и повышении энергоэффективности»: утв. 13 января 2012 года, № 541-IV (с изменениями и дополнениями по состоянию на 29.06.2020 г.).
- 11 Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана «Казахстан в новой реальности: время действий» – Нур-Султан, 1 сентября 2020 года.
- 12 Энергосберегающие технологии и способы энергосбережения. <https://ria.ru/eco/20081205/156573930.html> (дата обращения: 11.09.2017).
- 13 Алимгазин А.Ш., Алимгазина С.Г., Бахтияров А.Е. Энергосбережение и энергоэффективные технологии // Энергоэффективные и ресурсосберегающие



технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей: труды VIII междунар. научн. - практ. конф. – 2016. – С. 238-250.

14 Алимгазин А.Ш., Алимгазина С.Г. Перспективы применения энергосберегающих теплонасосных технологий с использованием альтернативных источников энергии на Аксуском заводе ферросплавов – филиале АО «ТНК «Казхром» // Вестник ПГУ им. С. Торайгырова, серия «Энергетика». – 2019. – № 4. – С.35-38.

15 Алимгазин А.Ш., Султангузин И.А., Алимгазина С.Г., Бахтиярова С.Е., Бахтияров А.Е. Перспективы применения абсорбционных технологий охлаждения и нагрева для повышения энергоэффективности промышленных предприятий Республики Казахстан / Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование: тез. докл. участ. XI междунар. научн. - техн. конф. – Алматы: НАО «АУЭС», 2020. – С. 17-19.

16 Сабитова М. К., Кинжибекова А.К. Использование электрических котлов для теплоснабжения микрорайона «Достык» г. Павлодар // Вестник ПГУ, серия «Энергетика». – 2019. – №1. – С. 372 - 377.

17 Актуальность внедрения новых экологически чистых и экономически выгодных технологий использования углей, <http://www.articlekz.com.01.02.2017>.

18 Абдурахманов А.А., Абиров А.А., Алимгазин А.Ш., Шарифов Д.М., Аубакир Д.А., Серикбаев Н.С. Анализ современного состояния вихревых теплогенерирующих установок // Матер. IV междунар. научн. - техн. конф. «Актуальные проблемы транспорта и энергетики. Пути их инновационного решения» – г. Астана: ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, 2016. – С. 320-322.

19 Рахматова М. У., Низомаддинов И. М. Энергосберегающие технологии и способы энергосбережения // Молодой ученый. – 2015, №23. – С. 212-214.

20 Технологии альтернативной энергетики. [http://www.energsovet.ru/bul\\_stat](http://www.energsovet.ru/bul_stat). 14.09.2017.

21 Новые технологии использования тепловой энергии недр // <http://nauka21vek.ru/archives/3473>. 13.09.2017.

22 Перспективы развития угольной отрасли в мире // <https://www.metalbulletin.ru/publications/2992>. 11.09.2017.

23 Угольная промышленность Казахстана. Компания «Юна LTD». <http://una.kz/company/news/otkryitie-kluba-modx-v-minske>. 21.01.2017.

24 Назарбаев Н.А. Глобальная энергоэкологическая стратегия устойчивого развития в XXI веке. – Астана: Экономика, 2011.

25 Добыча угля выросла на 2%, цены в рознице поднялись на 6%. <https://www.energyprom.kz/ru/a/monitoring/dobycha-uglya-vyroslo-na-2-ceny-v-roznice-podnyalis-na-6>. 14.01.2022.

26 Концепция развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан до 2030 года: утв. постановлением Правительства Республики Казахстан 28 июня 2014 года, №724.

27 Дорожная карта по развитию угольной отрасли Республики Казахстан на 2019-2021 годы. <https://kapital.kz/economic/84618/v-2019-godu-v-kazakhstanedobyto-svyshe-111-mln-tonn-uglya.html>. 09.12.2018.

28 Гусев Ю.Л. Основы проектирования котельных установок. – 1973г. – С. 248.

29 Свод правил Республики Казахстан СП РК 4.02-101-2012. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха (с изменениями от 01.08.2018 г).

30 Соколов Б.А. Котельные установки, работающие на твердом топливе: учеб. пособие / – М.: Академия, 2012. – 64 с.

31 Лоншаков А.С., Шемпелев, А.Г. Опыт сжигания непроектных топлив в котлах БКЗ-210-140 / Главный энергетик. – 2015, (11-12). – С. 44 -51.

32 Chen, X., Zhao, Q., and Liang, Z., Investigations on the Ash Deposit Formation of Tubular Air Preheater in a Coal-Fired Travelling Grate Boiler // Energy Fuels. – 2017. – Vol. 31. – P. 13215 - 13220.

33 Shi, Y., Wang, J., and Liu, Z., On-Line Monitoring of Ash Fouling and Soot-Blowing Optimization for Convective Heat Exchanger in Coal-Fired Power Plant Boiler // Appl. Therm. Eng. – 2015. – Vol. 78. – P. 39 - 50.

34 Tang, Z., Liu, D., Zhuang, Y., Chen, X., Ye, M., Sheng, H., and Xu, S., Experimental Investigation of Ash Deposits on Convection Heating Surfaces of a Circulating Fluidized Bed Municipal Solid Waste Incinerator // J. Environ. Sci. – 2016. – Vol. 48. – P. 169 - 178.

35 Кузнецов Н.В., Митор В.В, Дубовский И.Е. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / – М.: Энергия, 1973. – 296с.

36 Трёмбовля В.И., Фигнер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. – Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 416 с.

37 Надырова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Умыржан Т.Н., Хабиев М.М. Оптимизация работы энергетического оборудования // Матер. междунар. научн. - практ. конф. «Актуальные проблемы производства продуктов питания: состояния и перспективы развития, посвященной 75-летию член-корреспондента КазАСХН, д.т.н., профессора Е.Т. Тулеуова». – Семей, – С. 168-171.

38 Янов С.Р. Разработка рекомендаций и мероприятий по обеспечению тепловой эффективности поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. - Красноярск, 2010. – 144 с.

39 Vuthaluru, H.V. and French, D.H. Investigations into the Air Heater Ash Deposit Formation in Large Scale Pulverized Coal Fired Boiler // Fuel. – 2015. – Vol. 140. – P. 27 - 33.

40 Процесс шлакообразования и методы устранения шлакования. <https://msd.com.ua/teoriya-goreniya-i-topochnye-ustrojstva/process-shlakoobrazovaniya-i-metody-ustraneniya-shlakovaniya>. 29.11.2020.

41 Хажидинова А.Р., О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, Касымов А.Б. Повышение эффективности теплообмена в конвективной части котла КВ-Т-

116,3 -150 посредством оптимизации выбора технологии очистки // Вестник ГУ имени Шакарима города Семей. – Семей, 2020. – №4 (92). – С. 150-153.

42 Методы очистки поверхностей нагрева от золовых и шлаковых отложений. <https://msd.com.ua/kotelnye-ustanovki/metody-ochistki-poverxnostej-nagreva-ot-zolovyh-i-shlakovyh-otlozhenij>. 10.11.2020.

43 Колосов А. В. Способы очистки паровых котлов // Новости теплоснабжения. – 2014. – №5.

44 Новые технологии в теплоснабжении и строительстве: сб. работ асп. и студ. – сотруд. научно иссл. лаб. «Телознергетические системы и установки». Выпуск 17. [Электронный ресурс]. – Электронные данные. Ульяновск: УлГТУ. – 2019. – 146 с.

45 Трубчатые воздухоподогреватели стационарных котлов // Технические условия на капитальный ремонт / ТУ 34-38-20135-94.

46 Технологии очистки паровых котлов. [https://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=3232](https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3232). 10.11.2020.

47 Промывочные агрегаты. Способы очистки котлов. <http://stem.com.ru/оборудование/промывочные-агрегаты>. 27.05.2020.

48 «Бластинг: Гид по высокоэффективной абразивоструйной очистке» – Екатеринбург: ООО ИД «Оригами». – 2007 – С. 216.

49 Криогенный бластинг. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Криогенный\\_бластинг](https://ru.wikipedia.org/wiki/Криогенный_бластинг). 10.11.2020.

50 Звегинцев В.И., Шабанов И.И. Опыт создания пневмо- импульсных систем очистки конвективных поверхностей нагрева котельных агрегатов. // Энергетик. – 2009. – № 1. – С. 21-24.

51 Аглиулин С.Г., Николаев С.Ф., Звегинцев В.И., Юркин И.А., Шабанов И.И., Палкин В.Ф., Сергиенко С.П., Власов С.М. Исследование эффективности пневмоимпульсной очистки ширмовых поверхностей котла ПК-38 Назаровской ГРЭС. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 9. – С. 42-49.

52 Звегинцев В.И., Чиркашенко В.Ф., Харченко В.В., Серант Ф.А. Пневмоимпульсные системы очистки конвективной шахты котла П-67. // Электрические станции. – 2003. – № 7. – С. 19-22.

53 Зубер А. Опыт применения систем пневмоимпульсной очистки в Польше // Сб. докл. V научн. – практ. конф. «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы». – Челябинск. – 2011. – С. 27-37.

54 Лобанченко Н.Г., Гуляев М.А., Зудин Б.А. Обдувка поверхностей нагрева котельных агрегатов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952.

55 Подоляк В.Е., Безвесильный Е.В., Рыхлюк В.Н., Старовойтов В.С., Михновский О.Р. Опыт применения ультразвука для уменьшения накипеобразования в водогрейных котлах ВК-31 // Промышленная энергетика. – 1986. – №8. – С.30-34.

56 Панов П.И., Терехин Н.А., Шнайдер Р.Р., Сотников П.А., Гулер В.П. Очистка котлоагрегатов от шлаковых и золовых отложений / Решетневские чтения. – 2010. – №1(14) – С.325.

- 57 Журкин В.Г., Грингауз А.М.: пособие для изучающих правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов в вопросах и ответах. – М.: НПО ОБТ, – 2001. – 97с.;
- 58 Правило устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. С.П.: Госгортехнадзор России, – 2000. – 223 с.
- 59 Leithner R., Müller. H. CFD studies for boilers // Second M.I.T. Conference on Com-putational Fluid and Solid Mechanics. – Cambridge, 2003. – P.172.
- 60 Thenmozhi Ganesan, Dr. Sivakumar Lingappan. A Survey on Circulating Fluidized Bed Combustion Boilers // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2013. – Vol. 2, Issue 8. ISSN (Print): 2320 – 3765, ISSN (Online): 2278 – 8875.
- 61 Amol S. Kinkar, G. M. Dhote, R.R. Chokkar. CFD Simulation On CFBC Boiler // International journal of scientific & technology research. – 2015. – Vol. 4, Issue 02. ISSN 2277 – 8616.
- 62 Толеубеков К.О., Хажидинов А.С., Акаев А.С. Моделирование индукционного нагрева при имитации остаточного энерговыделения в кориуме при взаимодействии с жаропрочными материалами // Вестник НЯЦ РК – 2021; (1):9-14. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-1-9-14>.
- 63 Никифоров А.С., Приходько Е.В., Кинжибекова А.К., Карманов А.Е., Шупеева Ш.М.. Анализ тепловых потерь в окружающую среду высокотемпературными агрегатами // Вестник ПГУ, серия «Энергетика» – 2019. – №4. – С. 299-305.
- 64 Nan Zhang, Bona Lu, Wei Wang, Jinghai Li. 3D CFD simulation of hydrodynamics of a 150MWe circulating fluidized bed boiler // Chemical Engineering Journal. – 2010. 162. – P. 821 – 828.
- 65 Hoppe A., Vockrodt S., Müller H., Leithner, Einsatz R. Von CFD-Simulationenzur Optimierung von Braunkohlefeuerungen // 9<sup>th</sup> conference on boiler technology. – Szczyrk. – 2002.
- 66 Красинский Д.В., Саломатов В.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В., Шадрин Е.Ю. Моделирование топочных процессов при сжигании распыленного угля в вихревой топке нового типа // Горение твердого топлива: матер. VIII Всероссийской конфер. с междунар. участием / Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. – 2015. – С. 54.
- 67 Федорова Н.Н. и др. Основы работы в Ansys 17. – Москва: ДМК Пресс. – 2017. – 210 с.
- 68 Logan, Daryl L. A First Course in the Finite Element Method / SI Version, 5th Edition: CL Engineering. – 2011.
- 69 Ansys. <https://www.ansys.com>. 24.11.2016.
- 70 Ansys Release 11 Documentation for Ansys <https://procae.ru/downloads/file/58-ansys11.html>. 10.12.2017.
- 71 Введение в Ansys Workbench: учебно - методическое пособие для студентов естественно-научных дисциплин. – Саратов: Амирит, 2016. – 56 с. с ил.

72 Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учебное пособие. – Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 112 с.

73 Фомичев А. С., Корецкий Д. А., Заворин А. С., Коняшкин В. Ф., Харченко В. В. Применение программных комплексов Ansys в области разработки новых технологий для решения задач угольной энергетики // Матер. 8 всерос. конф. «Горение твердого топлива» (с междунар. участием). – Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Новосибирск, 2012. – С. 135.

74 Никифоров А. С., Приходько Е. В., Кинжибекова А. К., Карманов А. Е. Разработка программы расчёта температурных напряжений в футеровках высокотемпературных агрегатов // Вестник ПГУ имени С. Торайгырова. Серия «Энергетика». – Павлодар, 2018. – № 2. – С. 253 - 259.

75 Марьяндышев П.А., Чернов А.А., Любов В.К. Численное моделирование топочного процесса низкоэмиссионного вихревого котла // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 7. – С. 59-66.

76 Al-Abbas A.H. CFD modelling of air-fired and oxy-fuel combustion of lignite in 100 KW furnace // A.H. Al-Abbas, J. Naser, D. Dodds // Fuel. – 2011. – P. 1778–1795.

77 Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ FIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. – 2012 г. – Т. 19, №5. – С. 655-670.

78 Семенов С.А., Куриганов Д.Ю. Математическое моделирование состава твердых топлив на энергетическую эффективность котлов // Математическое моделирование – 2012. №4 (16). – С. 74-78.

79 Аскарова А.С., Болегенова С.А., Максимов В.Ю., Бекмухамет А., Оспанова Ш.С. Исследование образования вредных веществ в камере сгорания БКЗ-75 Шахтинской ТЭЦ // Матер. 8 всерос. конф. «Горение твердого топлива» (с междунар. участием). – Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Новосибирск, 2012. – С. 91 - 94.

80 Askarova A.S., Bolegenova S., Bekmukhamet A., Maximov V. 3D modeling of heat and mass transfer in industrial boilers of Kazakhstan power plant // 2nd International Conference on Mechanical, Production and automobile Engineering (ICMPAE-'2012). – Singapore, 2012. – P.217-220.

81 Romero, C.E., Vahedi, N., Yao, Z., and Stenger, H.G., Modeling of SO<sub>3</sub> Formation and Depletion Processes in Coal-Fired Boilers // Fuel. – 2020. – Vol. 280, Article ID 118355.

82 Fan, J.R., Zha, X.D., Sun, P., and Cen, F.F., Simulation of Ash Deposit in a Pulverized Coal-Red Boiler // Fuel. – 2001. – Vol. 80. – P. 645–654.

83 Taha, T.J., Stam, A.F., Brem, G., and Stam, K., CFD Modeling of Ash Deposition for Co-Combustion of MBM with Coal in a Tangentially Fired Utility Boiler // Fuel Process. Technol. – 2013. – Vol. 114. – P. 126 - 134.

84 Vuthaluru, H.B. and Vuthaluru, R. Control of Ash Related Problems in a Large Scale Tangentially Fired Boiler Using CFD Modeling // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87. – P. 1418 - 1426.

85 Martinson, C.A., van Schoor, G., and Uren, K.R., Energy and Exergy Analyses of a Subcritical Pulverised Coal-Fired Boiler Based on the Effects of Slagging and Fouling // IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Vol. 50, № 1. – P. 2017 - 2022.

86 Park, H.Y., Lee, J.E., Kim, H.H., Park, S., Baek, S.H., Ye, I., and Ryu, C., Thermal Resistance by Slagging and Its Relationship with Ash Properties for Six Coal Blends in a Commercial Coal-Fired Boiler // Fuel. – 2019. – Vol. 235. – P. 1377 - 1386.

87 Rousseau, P. and Laubscher, R., Analysis of the Impact of Coal Quality on the Heat Transfer Distribution in a High-Ash Pulverized Coal Boiler Using Co-Simulation // Energy. – 2020. – Vol. 108. Article ID 117343.

88 Ma Z., Iman F., Lu P., Sears R., Kong L., Rokanuzzaman A.S., McCollor D.P. and Benson S.A. A Comprehensive Slagging and Fouling Prediction Tool for Coal-Fired Boilers and Its Validation/Application // Fuel Process. Technol. – 2007. – Vol. 88. – P. 1035 - 1043.

89 Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. Ansys для инженеров: Справ. пособие. – М.: Машиностроение – 2004. 512 с.

90 Надырова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Елистратов С.Л. Моделирование в энергетике // Вестник ГУ имени Шакарима города Семей – 2017. – Т. 1, №2 (78). – С. 62 - 65.

91 Бруйка В.А. Инженерный анализ в Ansys Workbench: учебное пособие: Самарский Государственный технический университет. – Самара: 2010. – 271с.

92 Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферевьева М.А. Ansys в руках инженера: практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 С. ISBN 5-354-00238-9.

93 Зиганшин А.М. Вычислительная гидродинамика. Постановка и решение задач в процессоре Fluent: методическое пособие для учебной и научной работы студентов направления «Строительство» (квалификация «бакалавр» и «магистр») и аспирантов специальности 05.23.03. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитект.-строит. ун-та, 2013. – 79 с.

94 Калишук Д.Г., Саевич Н.П., Вилькоцкий А.И., Левданский А.Э. Процессы и аппараты химической технологии. Расчёт и проектирование массообменных аппаратов: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по химико-технологическим специальностям – Минск: БГТУ, 2014. – 497 с.

95 Коротких А.Г., Шаманин И.В. Основы гидродинамики и теплообмена в ядерных реакторах: учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет, 2007. – 117 с.

96 Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / А. Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш и др.;

Под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.: ил.

97 Надырова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Увалиев А.К. Исследование эффективности работы котельного агрегата КВ-Т-116,3-150 // Вестник ГУ имени Шакарима города Семей. – 2017, – Т. 1. № 1 (77). – С. 11-16.

98 Надырова А.Р., Степанова О.А. Исследование температурных полей поверхностей нагрева энергетического котла // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сборник тез. докл. 23 ежегодной междунар. научно-техн. конф. студентов и аспирантов. – Москва, 2017. – Т.3. – 53 с.

99 Надырова А.Р., Степанова О.А. Построение изотермических поверхностей топочной камеры энергетического котла // Матер. IV Российской молодежной научной школы-конференции «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи» – Томск: НИТПУ, 2016. – С. 345-347.

100 Надырова А.Р., Степанова О.А., Елистратов С.Л., Умыржан Т.Н., Хабиев М.М. Анализ эффективности процессов теплообмена в энергетическом оборудовании // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: сборник тез. докл. 24 ежегодной междунар. научно-техн. кон. студентов и аспирантов. – Москва, 2018. – 852с.

101 Khazhidinova A., Stepanova O., Yermolenko M., Kassymov A., Aldazhumanov Zh., Shayakhmetov Y., Baybalinova G., Nyssanbayeva S., Astemessova K., Turlybekova G. Influence of contamination of low-temperature heating surfaces of boiler on the intensity of convective heat exchange during the burning of non-design fuel / Heat Transfer Research. – 2022. – Volume 53, Issue 1. – P. 83-96. DOI: 10.1615/HeatTransRes.2021040471.

102 Паспорт котельного агрегата КВ-Т-116,3-150 ТЭЦ – 1 города Семей.

103 Syrodoy, S.V., Kuznetsov, G.V., Gutareva, N.Y., and Salomatov, V.V., The Efficiency of Heat Transfer through the Ash Deposits on the Heat Exchange Surfaces by Burning Coal and Coal-Water Fuels // J. Energy Inst. – 2018. – Vol. 91, № 6. – P. 1091 - 1101.

104 Бойко Е.А. Котельные установки и парогенераторы: учеб. пособие. – Красноярск, КГТУ. – 2005. - 292 с.

105 Определение оптимального положения факела <https://msd.com.ua/teplotekhnicheskoe-oborudovanie/opredelenie-optimalnogo-polozeniya-fakela>. 10.09.2016.

106 Карманное руководство «Термография». <https://ntcexpert.ru/documents/teplovizory/Prakticheskoe-rukovodstvo-promishlennoy-termografii.pdf>. 24.11.2020.

107 Портативный компьютерный термограф «ИРТИС 2000». <http://www.fid-tech.com/bd/tec/0028.shtml>. 14.09.2016.

108 Излучательные свойства твердых материалов: справочник / Л.Н. Латыев [и др.]; под общ. ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

109 Уголь разреза Каражыра. <http://www.karazhyra.kz>. 10.12.2016.

- 110 А.с. 14347 Трехмерная теплофизическая модель рекуперативного трубчатого воздухоподогревателя котельного агрегата / А.Р. Хажидинова, А.С. Хажидинов, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко; опублик. 11.01.2021, – 2 с.
- 111 Исаченко В.В., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416с.
- 112 Incropera, F.P., DeWitt, D., Bergman, T.L., Lavine, A.S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- 113 Надырова А.Р., Степанова О.А., Елистратов С.Л. Моделирование процессов теплообмена в хвостовых поверхностях нагрева котла КВ-Т-116,3-150 // Матер. V междунар. мол.форума «Интеллектуальные энергосистемы». – Томск, 2017 г. – С. 54-58.
- 114 Погрешность измерения. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Погрешность измерения](https://ru.wikipedia.org/wiki/Погрешность_измерения). 14.02.2021.
- 115 Хажидинова А.Р., Степанова О.А., Ермоленко М.В., Паримбеков З.А., Мануленко А.И. Расчет аэродинамического сопротивления воздухоподогревателя водогрейного котла // Матер. междунар. блендинг-конф. «Образование – фундамент евроазиатского сотрудничества», посвященной 85-летию Университета Шакарима / Государственный университет имени Шакарима города Семей. – Семей, 2019. С. 71 - 72.
- 116 Wu, X., Zhang, X., Yan, K., Chen, N., Zhang, J., Xu, X., Dai, B., Zhang, J., and Zhang, L. Ash Deposition and Slagging Behavior of Chinese Xinjiang High-Alkali Coal in 3 MWth Pilot-Scale Combustion Test // Fuel. – 2016. – Vol. 181. – P. 1191–1202.
- 117 Zhang, Y., Du, X., Yue, M., Yan, M., and Shi, Y. Heat Transfer and Ash Deposition Performance of Heat Exchange Surface in Waste Incineration Flue Gas // Int. J. Heat Mass Transf. – 2020. – Vol. 155. Article ID 119691.
- 118 Петров В.А., Кулагина М.М. Определение расчетной минимальной температуры металла стенок труб воздухоподогревателей // Теплоэнергетика. – 1990. – №5. – С. 63-66.
- 119 Tsvetkov, F.F. Heat and Mass Transfer. – Moscow: MEI Press, 2011.
- 120 Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
- 121 Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П. Гидравлика и аэродинамика: учеб. для вузов – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о внесении сведений в Государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом

КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ  
МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

**КУӘЛІК**  
2021 жылғы «11» қаңтар № 14347

Автордың (лардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе):  
ХАЖИДИНОВА АҚБОТА РЫСПЕКОВНА, ХАЖИДИНОВ АЗАМАТ САГИНАЕВИЧ, СТЕПАНОВА  
ОЛЬГА АЛЕКСАНДРОВНА, ЕРМОЛЕНКО МИХАИЛ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

Авторлық құқық объектісі: ЭЕМ-ге арналған бағдарлама

Объектінің атауы: Трехмерная теплофизическая модель рекуперативного трубчатого  
воздухоподогревателя котельного агрегата

Объектіні жасаған күні: 06.01.2021



Құжат тұщусықалығын <http://www.kazpatent.kz/ru> сайтының  
"Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады. <https://copyright.kazpatent.kz>

Подлинность документа возможно проверить на сайте [kazpatent.kz](http://kazpatent.kz)  
в разделе «Авторское право» <https://copyright.kazpatent.kz>

ЭЦҚ қол қойылды

Оспанов Е.К.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Акт внедрения результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

и.о. проректора  
по учебно-воспитательной работе  
НАО «Университет имени Шакарима  
города Семей»  
А.Л. Касенов  
« 14 » 12 2020 г.



#### АКТ

внедрения результатов научно-исследовательской работы Хажидиновой А.Р.

Комиссия в составе:

Председатель: Кливенко А.Н., PhD. и.о. проректора по науке и коммерциализации

Члены комиссии: Байбалинова Г.М., к.т.н., зам. декана инженерно-технологического факультета  
Степанова О.А., к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Техническая физика и теплоэнергетика»

Комиссия подтверждает, что результаты научно-исследовательской работы по теме диссертации «Экспериментальное исследование и моделирование процессов теплообмена в элементах водогрейных котлов» Хажидиновой Акботы Рыспековны использованы при изучении дисциплин «Котельные установки и парогенераторы», «Специальные вопросы сжигания топлива» на учебной кафедре «Техническая физика и теплоэнергетика» НАО «Университет имени Шакарима города Семей» и внедрены в учебный процесс.

Внедрение результатов научно-исследовательской работы дает возможность проведения тепловых расчетов для непроектных топлив, при изменении качественного состава топлива или при переходе на другие виды топлива.

Председатель комиссии:

А.Н. Кливенко

Члены комиссии:

Г.М. Байбалинова

О.А. Степанова

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акт №1 о внедрении результатов работы в ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей

Заместитель директора ГКП «Теплокоммунэнерго» г. Семей



Н. Дёмин  
«02» «10» 2020 г.

#### АКТ № 1

о внедрении результатов диссертационной работы Хажидиновой А.Р. «Экспериментальное исследование и моделирование процессов теплообмена в элементах водогрейных котлов» в ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей

Комиссия в составе:

Председатель:

Члены комиссии:

Кузкенов А.С. начальник ТЭЦ-1

Жампеисов А.С., начальник ПТО;

Кунакбаев Н.М., заместитель начальника ТЭЦ-1;


Бектемисов А.А., инженер ПТО.


Комиссия подтверждает, что в рамках выполнения диссертационной работы по теме «Экспериментальное исследование и моделирование процессов теплообмена в элементах водогрейных котлов» Хажидиновой А.Р. разработаны режимные карты в виде номограмм определения коэффициента полезного действия котла при условиях наличия и отсутствия загрязнений на поверхности воздухоподогревателя и внедрены в эксплуатацию водогрейного котла КВТ-116,3-150 ТЭЦ – 1 города Семей. Номограммы позволяют прогнозировать КПД котельного агрегата в зависимости от теплопроизводительности, скорости нагретого воздуха, температуры уходящих дымовых газов с учетом состояния теплообменной поверхности.

Настоящий акт составлен в 3 (трех) экземплярах и передан на хранение: первый экземпляр – в ГКП «Теплокоммунэнерго» г. Семей, второй экземпляр – на кафедру «Техническая физика и теплоэнергетика» НАО «Университет имени Шакарима города Семей», третий экземпляр – в отдел по управлению научной и инновационной деятельностью НАО «Университет имени Шакарима города Семей».


Председатель комиссии:

Члены комиссии:

 А. Кузкенов

 А. Жампеисов

 Н. Кунакбаев

 А. Бектемисов



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Акт №2 о внедрении результатов работы в ГКП «Теплокоммунэнерго» города Семей

Заместитель директора ГКП «Теплокоммунэнерго» г. Семей



УТВЕРЖДАЮ  
Н. Демин  
« 02 » 10 2020 г.

#### АКТ №2

о внедрении результатов диссертационной работы Хажидиновой А.Р.  
«Экспериментальное исследование и моделирование процессов теплообмена  
в элементах водогрейных котлов» в ГКП «Теплокоммунэнерго» города  
Семей

Комиссия в составе:

Председатель:

Кузкенов А.С., начальник ТЭЦ-1;

Члены комиссии:

Жампеисов А.С., начальник  
ПТО;  
Кунакбаев Н.М., заместитель  
начальника ТЭЦ-1;  
Бектемисов А.А., инженер ПТО.

Комиссия подтверждает, что в рамках выполнения диссертационной работы по теме «Экспериментальное исследование и моделирование процессов теплообмена в элементах водогрейных котлов» Хажидиновой А.Р. установлены зависимости температуры уходящих дымовых газов и КПД котла от толщины слоя отложений на поверхности воздухоподогревателя, предложен критерий периодичности очистки воздухоподогревателя в виде критического значения температуры уходящих дымовых газов равной 157 °С. Внедрение результатов научно-исследовательской работы в процесс эксплуатации водогрейного котла КВТ-116,3-150 позволило оптимизировать работу агрегата, увеличить продолжительность его бесперебойной работы и годовой коэффициент рабочего времени.

Настоящий акт составлен в 3 (трех) экземплярах и передан на хранение: первый экземпляр – в ГКП «Теплокоммунэнерго» г. Семей, второй экземпляр – на кафедру «Техническая физика и теплоэнергетика», третий экземпляр – в отдел по управлению научной и инновационной деятельностью НАО «Университет имени Шакарима города Семей».

Председатель комиссии:

А. Кузкенов

Члены комиссии:

А. Жампеисов

Н. Кунакбаев

А. Бектемисов



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Свидетельство обладателя гранта на поездку Фонда Первого Президента  
Республики Казахстан – Лидера Нации

  
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ТҰҢҒЫШ  
ПРЕЗИДЕНТІ - ЕЛБАСЫНЫҢ ҚОРЫ

# СВИДЕТЕЛЬСТВО

**ВЫДАНО**

## Надыровой Акботе Рыспековне

докторанту PhD Государственного университета  
им. Шакарима, обладателю Гранта на поездку для участия  
в 23 ежегодной Международной научно-технической кон-  
ференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника,  
электротехника и энергетика», г. Москва, РФ

Директор Представительства  
Фонда Первого Президента  
Республики Казахстан —  
Лидера Нации в г. Алматы

Тохтаров С.Т.

АЛМАТЫ - 2017 Г.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Диплом за участие в конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ "МЭИ"

ДВАДЦАТЬ ТРЕТЬЯ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА,  
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЭНЕРГЕТИКА**

**ПОЧЕТНЫЙ  
ДИПЛОМ**

**за участие**

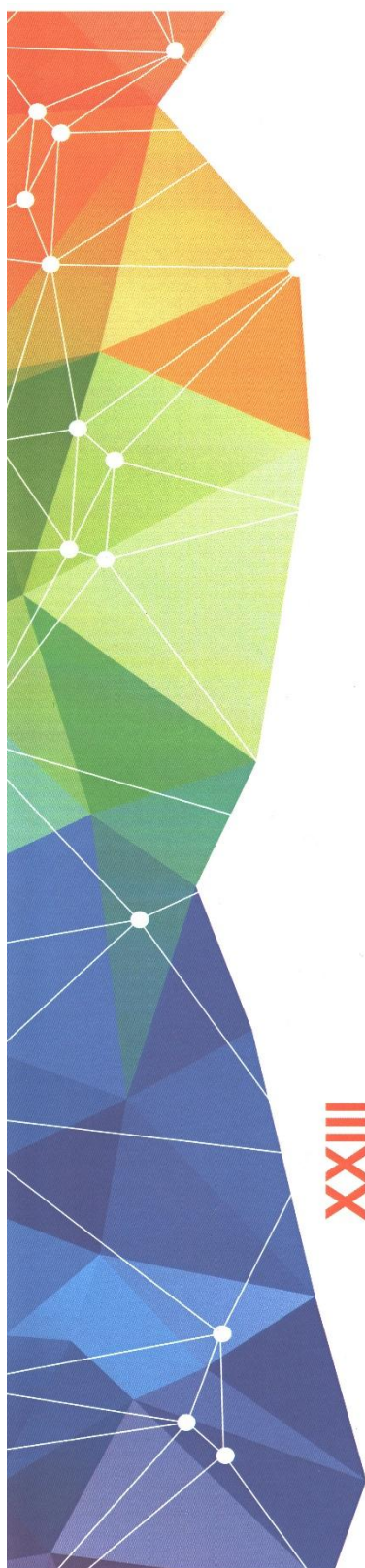
Награждается Кадырова А.Р.  
за доклад на секции 40  
"Термодинамика"

Ректор НИУ "МЭИ" Н.Д.Роголев Н.Д.Роголев  
Председатель секции О.А.Султанов О.А.Султанов

МОСКВА 2017 год

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Сертификат участия в конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»



**XXIII**

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ И АСПИРАНТОВ  
"РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭНЕРГЕТИКА"  
**2-3 МАРТА 2017**

# СЕРТИФИКАТ УЧАСТНИКА

Николова Е. А. \_\_\_\_\_ Руководитель Молодежной секции РНК СИГРЭ

Королев А. С. \_\_\_\_\_ Благотворительный фонд "Надежная смена"





## ПРИЛОЖЕНИЕ И

Сертификат участия в XVI Конференции-конкурсе НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
ИНСТИТУТ РАДИАЦИОННОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКОЛОГИИ  
РГП НЯЦ РК

XVI КОНФЕРЕНЦИЯ-КОНКУРСА НИОКР  
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ НЯЦ РК

# СЕРТИФИКАТ

НАСТОЯЩИЙ СЕРТИФИКАТ ВЫДАН

**НАДЫРОВОЙ АКБОТЕ  
РЫСПЕКОВНЕ**

ПРЕПОДАВАТЕЛЮ КАФЕДРЫ  
«ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»  
ГУ ИМ. ШАКАРИМА ГОРОДА СЕМЕЙ

УЧАСТНИКУ XVI КОНФЕРЕНЦИИ-КОНКУРСА  
НИОКР МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ И СПЕЦИАЛИСТОВ  
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР  
РГП НЯЦ РК, д.ф. - м.н.



БАТЫРБЕКОВ Э. Г.

WWW.NNC.KZ  
WWW.IRSE.KZ

3.5.2017 - 5.5.2017 г.

г.КУРЧАТОВ



## ПРИЛОЖЕНИЕ К

Диплом «Жыл докторанты» ГУ имени Шакарима города Семей

