

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

КАШТАНОВ Дмитрий Иванович

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА КОНВЕКТИВНЫХ
ПАКЕТОВ КОТЛОВ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОГО ПОТОКА**

Специальность 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
ЯКОВЛЕВ Виктор Александрович

Санкт-Петербург – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ	9
1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ КОНВЕКТИВНЫХ ПАКЕТОВ.....	15
1.1. Факторы неудовлетворительной работы котлов	15
1.2. Физико-химические характеристики золы и золовых отложений	20
1.3. Физико-химические характеристики сажи и сажистых отложений.....	27
1.4. Физические основы влияния сил, действующих на твердые частицы в газовом потоке.....	31
1.5. Выводы по разделу 1	48
2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЯМИ НАГРЕВА, ОБРАЗОВАНИЕ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	49
2.1. Принципы взаимодействия твердых частиц с теплообменными поверхностями труб в конвективных пакетах.....	49
2.2. Принципы формирования натрубных отложений.....	56
2.2.1. Зависимости формирования отложений от времени эксплуатации котлоагрегата.....	62
2.2.2. Зависимости формирования отложений от скорости продуктов сгорания.....	66
2.2.3. Зависимости формирования отложений от диаметра труб конвективных пакетов	72
2.2.4. Зависимости формирования отложений от схемы размещения труб в конвективных пакетах.....	73
2.2.5. Зависимости формирования отложений от тепловых режимов работы котлоагрегата.....	74
2.2.6. Зависимости формирования отложений от размера фракций и концентраций золы в потоке продуктов сгорания	76
2.3. Выводы по разделу 2	81

3. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	82
3.1. Характеристики объекта исследования	82
3.2. Методика проведения натурного эксперимента по определению толщины натрубных отложений	85
3.3. Планирование эксперимента по определению толщины отложений....	88
3.4. Постановка задачи численного моделирования	90
3.5. Планирование эксперимента по определению коэффициентов загрязнения	103
3.6. Выводы по разделу 3	106
4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ	107
4.1. Результаты исследований натрубных отложений	107
4.2. Определение средней толщины натрубных отложений.....	132
4.3. Определение коэффициентов загрязнения	138
4.3.1. Зависимости образования отложений от расхода продуктов сгорания.....	141
4.3.2. Зависимости образования отложений от схемы размещения труб в конвективных пакетах	143
4.4. Инженерная методика теплового расчёта конвективных пакетов	144
4.5. Рекомендации по повышению тепловой эффективности конвективных пакетов котлов эксплуатирующихся в условиях запыленного потока дымовых газов.....	147
4.6. Выводы по разделу 4.....	147
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ.....	149
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	150
ПРИЛОЖЕНИЯ	171
Приложение А – Результаты исследований толщины натрубных отложений в конвективных пакетах котлов КВу-1,0	172

Приложение Б – Результаты численного моделирования натрубных отложений в сечении конвективных пакетов для котла КВу–1,0	177
Приложение В – Результаты теплового расчета конвективных поверхностей нагрева котла КВу–1,0	181
Приложение Г – Листинг программного кода математической модели, описывающей физические принципы формирования натрубных отложений, реализованного в функциях <i>UDF</i> для численного моделирования работы конвективного пакета в <i>ANSYS Fluent</i>	184
Приложение Д – Акты внедрения результатов научных исследований	189

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

m_p – масса твердой частицы, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

w – угловая скорость частицы, рад/с;

B – радиус вращения частицы, м;

ρ_p – плотность частицы, кг/м³;

d_p – диаметр частицы, м;

v_θ – касательная составляющая скорости частицы;

C_D – коэффициент сопротивления частицы;

ρ_r – плотность газовой среды, кг/м³;

S – площадь поперечного сечения движущейся частицы, м²;

v_r – скорость газовой среды, м/с;

v_p – скорость частицы, м/с;

l – длина свободного пробега молекул газовой среды, м;

V_p – удельный объём частицы, м³/кг;

m_f – масса газовой среды, вытесненной находящейся в ней частицей, кг;

τ – время, с;

p – давление газовой среды, Па;

C_{Mag} – коэффициент подъемной силы;

C_v – коэффициент присоединенной массы;

r_p – радиус частицы, м;

μ_g – коэффициент динамической вязкости газовой среды, Па·с;

t – время движения частицы, с;

$\vec{v}_{от}$ – скорость присоединенной массы относительно частицы, м/с;

τ_p – время релаксации частицы в потоке газа, с;

$(v'_p)^2$ – среднеквадратичная скорость движения частицы, $\text{м}^2/\text{с}^2$;
 s – расстояние от движущейся частицы до поверхности осаждения, м ;
 D – диаметр конвективного газотока, м ;
 T_r – температура газовой среды, К ;
 T_p – температура частицы, К ;
 ∇T_r – градиент температуры газовой фазы в месте нахождения частицы, в случае если частица отсутствует;
 Φ – термофоретический коэффициент;
 Kn – число Кнудсена;
 C_c – поправочный коэффициент Каннингема к закону Стокса;
 ν_r – кинематическая вязкость газовой среды, $\text{м}^2/\text{с}$;
 H – бесстолкновительный предел термофоретической силы;
 u_∞ – компонент скорости частицы вдоль оси x ;
 St – число Стокса;
 q_1 – полезно используемая тепловая энергия, %;
 q_2 – потери теплоты с уходящими газами, %;
 q_3 – потери теплоты с химическим недожогом топлива, %;
 q_4 – потери теплоты с механическим недожогом топлива, %;
 q_5 – потери теплоты через наружные ограждения котла, %;
 q_6 – потери теплоты с удаляемым из топки шлаком, %;
 S_0 – спектральная плотность флуктуаций скорости броуновской частицы;
 ζ – число с Гауссовым распределением;
 $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ;
 q – заряд частицы, Кл;
 \vec{E} – напряженность электрического поля, В/м;
 u_* – коэффициент трения о стенку вертикального воздуховода;
 D_p – коэффициент броуновского движения частиц;

Sc – число Шмидта;

$E_{p,elst,1}$ – электростатическая энергия частицы до столкновения, Дж;

$E_{p,elst,2}$ – электростатическая энергия частицы после столкновения, Дж;

$E_{p,kin,1}$ – кинетическая энергия частицы до столкновения, Дж;

E_{ad} – энергия адгезии, Дж/м²;

E_l – потери энергии в процессе пластической деформации частицы в ходе удара, Дж;

L_c – характерная длина шероховатости стенки;

E – модуль Юнга, Па;

$T_{шл}$ – температура начала шлакования, К;

$q_{шл}$ – интенсивность шлакования, кг/м²с;

$\mu_{зл}$ – концентрация загрязняющих частиц, г/м³;

δ_3 – толщина слоя загрязнений, м;

E' – коэффициент, учитывающий вероятностный характер столкновения движущихся в потоке частиц с поверхностью труб;

$K_{шл}$ – коэффициент шлакования;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);

M – молекулярный вес газовой среды, а.е.м.;

r – радиус наружной поверхности конвективной трубы, м;

T_3 – абсолютная температура поверхности золошлаковых отложений, К;

λ_r – коэффициент теплопроводности газовой среды, Вт/(м·°С);

λ_3 – коэффициент теплопроводности золошлаковых отложений, Вт/(м·°С);

B_p – расчетный расход топлива, кг/ч;

A^p – зольность рабочего состава топлива, %;

V_r – удельный объем продуктов сгорания, м³/кг;

$a_{ун}$ – доля золы топлива в уносе;

E_{δ} – коэффициент вероятности столкновения частиц с поверхностью конвективных труб;

$q_{л}$ – тепловой поток, переданный поверхности тепловым излучением, Вт;

$q_{к}$ – тепловой поток, переданный поверхности конвекцией, Вт;

R_{30} – количество твердых частиц, оставшихся после просеивания на сите с размером ячеек 30 мкм, %;

ε – коэффициент загрязнения, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$;

c_d – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент загрязнения наружного диаметра труб конвективных пакетов;

$c_{фр}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние на коэффициент загрязнения фракций летучей золы;

$\eta_{\text{мех}}$ – коэффициент, учитывающий потери механической энергии из системы соприкасающихся в момент удара тел при деформации в области касания;

β – угол атаки поверхности отложений движущимися частицами;

$F_{\text{ад}}$ – адгезионная сила;

$v_{p, \text{отск}}$ – скорость частицы при отскоке от трубки, м/с;

σ_1 – относительный шаг труб в ряду конвективного пакета;

σ_2 – относительный шаг рядов труб конвективного пакета;

R_3 – термическое сопротивление слоя загрязнений, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$;

k_3 – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к поверхности труб при наличии отложений, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$;

α_3 – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к наружной поверхности слоя отложений, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$;

k – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к незагрязненной (чистой) поверхности труб, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$;

α – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к наружной поверхности незагрязненных труб, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Тепловая эффективность конвективных поверхностей нагрева водотрубных котлов в процессе их эксплуатации зависит от степени загрязнения наружной и внутренней поверхности. Продукты сгорания топлива являются запыленной газовой средой и в ряде случаев могут содержать в своём составе значительное количество твёрдых частиц (преимущественно частиц сажи и золы). При эксплуатации котлов в условиях запыленного потока наблюдается рост сажистых и золовых отложений на наружных поверхностях конвективных труб. Такое явление со временем эксплуатации приведёт к увеличению теплотерь с уходящими газами, перерасходу топлива, следствием чего будет снижение коэффициентов теплопередачи и КПД котлов.

В настоящее время в инженерной методике теплового расчёта применяется усредненная величина термического сопротивления слоя сажистых и золовых отложений, представленная пределом эмпирических констант не зависящих от конструкции конвективных пакетов и режимов работы оборудования. Более углублённое изучение физических основ образования натрубных отложений и проведение представленных в диссертации научных исследований позволит для оценки эффективности теплообмена конвективных пакетов котлов в условиях запыленного потока получить новые расчётные зависимости, усовершенствовать методику теплового расчёта и повысить точность искомых данных.

Степень разработанности темы исследования. В качестве теоретической базы для анализа процессов теплообмена в конвективных пакетах водотрубных котлов при работе в условиях запыленного потока продуктов сгорания использованы работы отечественных и зарубежных авторов: А.Н. Алехновича, Ф.Г. Бакирова, В.Ю. Безруких, Э.П. Дика, А.С. Заворина, О.Н. Зайцева, В. М. Кашеева, А.Г. Кочева, Н.В. Кузнецова, И.Р. Микка, Ю. В. Муранова, Ю.Я. Ракова, Н.Е. Семичевой, Р.С. Рамазанова, И.П. Эпика, В.А. Яковлева,

Р. Дееб (R. Deeb), М. Гарсиа Перес (M. García Pérez), У. Клейнханс (U. Kleinhans), И. Тянь (Y. Tian), Я. Синь (X. Yang), Х.У. Зеттлер (H.U. Zettler) и др.

На основании понимания теоретических основ теплообмена и газодинамики, а также опыта проведения инженерных тепловых расчётов котлов выдвинута рабочая **гипотеза** – определение коэффициентов загрязнения (термического сопротивления) для конвективных пакетов водотрубных котлов малой мощности при работе на твёрдых видах топлива, а также выявление формы поперечного сечения наружной поверхности труб позволит спрогнозировать рост отложений в процессе эксплуатации котлов.

Цель исследования заключается в выявлении условий, оказывающих влияние на активность процессов роста сажистых и золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных пакетов, в разработке методов, направленных на снижение активности их образования в процессе эксплуатации оборудования.

Задачи исследования:

1. Проанализировать физические явления, оказывающие влияние на показатели тепловой эффективности водотрубных котлов, а также процессы роста отложений в конвективных пакетах;
2. Разработать математическую и численные модели образования сажистых и золовых отложений с учетом конструкции конвективных секций;
3. Проанализировать влияние формы поверхности наружного слоя золовых отложений на тепловую эффективность котлов;
4. Выявить форму труб, позволяющую снизить активность роста сажистых и золовых отложений в процессе эксплуатации котлов;
5. Усовершенствовать инженерную методику теплового расчёта, позволяющую определять значения коэффициентов загрязнения (термического сопротивления) в зависимости от конструкции конвективных пакетов и режимных параметров работы котлов.

Объектом исследования являются конвективные пакеты водотрубных котлов.

Предметом исследования являются газодинамические и теплообменные процессы при формировании слоя сажистых и золовых отложений на наружных поверхностях конвективных труб водотрубных котлов.

Научная новизна исследования:

1. Разработаны численные модели образования золовых отложений с учётом схем размещения труб в конвективных пакетах котлов;
2. Установлена зависимость толщины натрубных отложений от геометрических характеристик поверхности конвективного пакета в пространстве;
3. Установлены зависимости коэффициента загрязнения от геометрических характеристик конвективных пакетов и режимного параметра работы котлов.

Теоретическая значимость работы заключается в расширении области применения зависимостей, описывающих процессы формирования слоя золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных пакетов.

Практическая значимость работы заключается в:

- усовершенствовании инженерной методики теплового расчёта, позволяющей вычислять коэффициенты загрязнения (термического сопротивления) в зависимости от конструкции конвективных пакетов и режимов работы котлов;
- разработке рекомендаций по повышению тепловой эффективности конвективных пакетов котлов эксплуатирующихся в условиях запыленного потока дымовых газов.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационной работы являются основные положения теории теплообмена и газодинамики. Используются методы математической статистики планирования физического эксперимента и численного моделирования турбулентных течений дисперсной среды.

Положения, выносимые на защиту:

1. Оценка влияния физических факторов на активность процессов образования слоев сажистых и золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных пакетов;
2. Обоснованная форма профиля поперечного сечения конвективных труб для снижения роста натрубных отложений;
3. Математическая и численные модели образования сажистых и золовых отложений с учетом расхода дымовых газов, формы поперечного сечения конвективных труб и схем их размещения в пучке;
4. Зависимости коэффициентов загрязнения характеристик конструкции конвективных пакетов и режимных параметров работы котлов;
5. Инженерная методика теплового расчёта, позволяющая вычислять значения коэффициентов загрязнения (термического сопротивления) в зависимости от конструкции конвективных пакетов и режимов работы котлов.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 2.1.3. «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» п. 3: «Разработка и совершенствование систем теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха, разработка методов энергосбережения систем и элементов теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, аспирации и пневмотранспорта, включая использование альтернативных, вторичных и возобновляемых источников энергии; развитие методов моделирования многофазных потоков и динамических процессов в аэродисперсных системах», п. 4: «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность определяется удовлетворительным совпадением результатов численных и натурных исследований, не противоречат известным данным. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: II Межрегиональной конференции развития строительной отрасли 21–23 сентября 2023 года г. Вологда; LXXVI Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 17–20 октября 2023 г. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; LXXVII Международной научно-практической конференции 22–23 ноября 2023 г. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве», 18–22 марта 2024 г.; LXXVIII Международной научно-практической конференции 21–22 ноября 2024 г. Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; II Национальной (всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве», 24–28 марта; XXIII Международной ежегодной научной конференции «Качество внутреннего воздуха и окружающей среды» 18–24 сентября 2025 г. в Таджикском техническом университете им. академика М.С. Осими, г. Душанбе; Национальном (Всероссийском) симпозиуме «Численное моделирование в климатических системах» 20-23 октября 2025 года.

Публикации. Основные научные результаты диссертационного исследования опубликованы в 5 научных работах, общим объемом 3,95 п. л., в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень изданий рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация содержит 192 страницы, 18 таблиц, 55 рисунков, 72 формулы, 5 приложений, список литературных источников содержит 158 наименований.

Автор выражает благодарность В.А. Яковлеву, В.Ю. Безруких, В.М. Уляшевой, В.А. Пухкалу, А.М. Чепкину, своим родителям за помощь и поддержку в работе над написанием диссертации.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ КОНВЕКТИВНЫХ ПАКЕТОВ

1.1. Факторы неудовлетворительной работы котлов

По данным исследований [21, 62] в регионах Российской Федерации большинство твердотопливных отопительных котельных с установленными в них водогрейными котлами малой мощности рассчитано на использование в качестве основного топлива – ископаемого угля с содержанием влаги в рабочем составе менее 8 %, мелких фракций с размером частиц менее 6 мм [95] с содержанием негорючих минеральных примесей. В связи с использованием более доступных местных видов топлива, организации совместного сжигания нескольких их видов [44], а также снижении стоимости закупаемого топлива при выборе более дешёвых и доступных его аналогов, выбираемых в целях сокращения капитальных затрат на закупку топлива (переход на сжигание углей низкосортных марок) [21] при эксплуатации котлов может привести к повышенному образованию вредных веществ и химического недожога в продуктах сгорания. При этом в процессе эксплуатации котлов частицы золы и сажи будут активно осаждаться на поверхностях нагрева в связи с чем снизятся тепловые и энергоэкономические показатели котельных, а также надёжность работы теплообменного оборудования [13].

Причинами неудовлетворительной работы котлов и аварийных ситуаций на них могут являться [96]:

- нарушение водно-химического режима нагреваемого теплоносителя котельной вследствие несоблюдения технологии подготовки подпиточной воды или использования для заполнения котлового контура котельной неподготовленной (исходной) воды;
- формирование различных видов коррозии, поражающей металл теплообменных труб, ускоряющих износ различных узлов конструкции и элементов котлоагрегата;

– ненормативное (повышенное или пониженное для данного котла) давление нагреваемого теплоносителя, возникающее вследствие ошибок регулирования режимов работы котельной;

– эксплуатация котлоагрегатов на запыленном потоке дымовых газов с высокими концентрациями сажистых и золовых частиц;

– иные причины, приводящие к износу котлов, внеплановому выводу их из работы, снижению времени эксплуатации оборудования между периодами ремонтных работ [96].

Из приведённого перечня причин, особую роль на работу котлов оказывает наличие в потоке дымовых газов твердых частиц с высоким содержанием минеральных примесей, которые, выпадая из потока, создают на наружной поверхности теплообменных труб слой загрязнений (отложений) [103, 106, 116]. Со временем эксплуатации оборудования, накапливающиеся на поверхностях нагрева отложения приводят к: снижению коэффициентов теплопередачи; увеличению расхода топлива; аэродинамического сопротивления газового тракта; потере теплоты с уходящими газами [106]; химической неполноты сгорания [103, 114, 150, 75]. Состояние поверхностей нагрева после продолжительной работы котлов на сильнозапыленном потоке дымовых газов представлено на рис. 1.1.

Образующиеся в процессе сгорания органического твёрдого топлива дымовые газы по химическому составу могут быть разделены на несколько групп [101]:

– продукты полного сгорания топлива (содержащие только конечные продукты реакций и балластные компоненты: диоксид углерода, водяной пар, азот, кислород (избыточно поданный));

– продукты неполного сгорания топлива (дополнительно к содержанию конечных продуктов реакции и балластных компонентов могут включать в свой состав: оксид углерода, сажистые частицы, летучие органические соединения и др.);

– побочные продукты полного сгорания топлива (оксиды азота и др.);
– вещества, образующиеся из содержащихся в исходном топливе примесей (диоксид серы, твердые частицы (золовые частицы, коксовые частицы), фтороводород и др.).

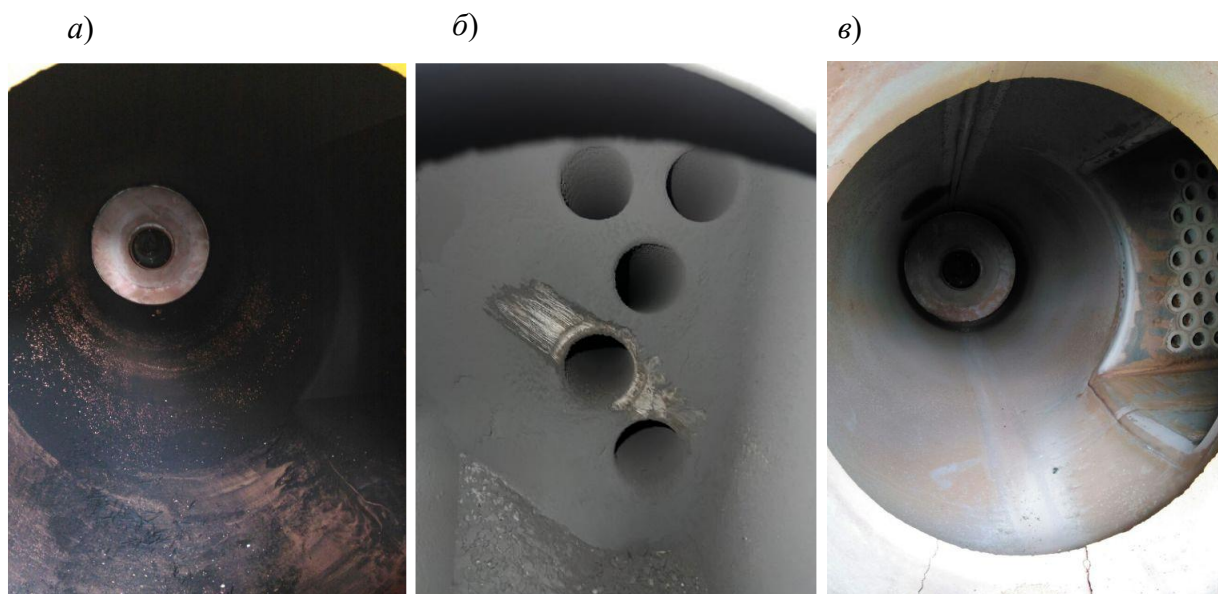


Рис. 1.1 – Состояние поверхностей нагрева жаротрубных котлов: *а), б)* – топка после эксплуатации котлоагрегата с большим содержанием сажи в потоке дымовых газов; *в)* – топка с чистыми поверхностями после проведения работ по очистке

Особенностью эксплуатации котлов при накоплении за время работы сажистых и золовых отложений является необходимость согласовывать режимы сжигания твёрдого топлива с периодами работы оборудования ручной либо механизированной системы очистки поверхностей нагрева [15].

По результатам испытаний котла КВТС-20, работающего на углях Олонь-Шибарского месторождения [14] были получены результаты, где видно, что потери теплоты от химической неполноты сгорания в сумме с потерями теплоты с уходящими газами составляют значительную долю от общих тепловых потерь (рис. 1.2). Высокие потери теплоты с уходящими газами могут являться следствием, а потери теплоты с химическим недожогом могут являться причиной загрязнений наружных поверхностей трубок осевшими твердыми частицами.

Так как слой сажистых и золовых отложений вследствие их низкой теплопроводности приводит к снижению коэффициента теплопередачи со стороны продуктов сгорания [35, 44, 49, 54, 106, 114, 150], в результате снижается тепловой поток от греющих газов к нагреваемому теплоносителю, приводящий к росту тепловых потерь с уходящими газами [26].

В работе [21] представлен перечень причин неудовлетворительной работы и отказов котельного оборудования, выраженный в процентах от общего числа произошедших аварийных ситуаций, составленный в ходе анализа работы твердотопливных котельных и теплоэлектростанций России за 30-и летний период их работы (рис. 1.3).

На основании диаграммы (рис. 1.3) можно сделать вывод, что перегрев металла теплообменных труб и их абразивный золовой износ, который наиболее часто вызван наличием в потоке дымовых газов высокой концентрации золовых частиц и частиц агломерировавшейся сажи и золы, составляет треть от всех изученных аварийных ситуаций, что является существенной величиной.

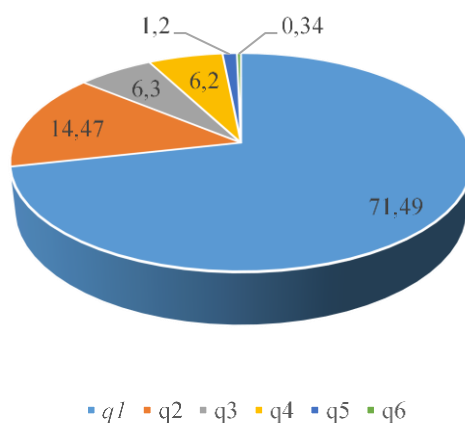


Рис. 1.2 – Распределение тепловых потерь в процентах от располагаемой теплоты сгорания топлива по результатам испытаний котла КВТС-20 [14]; q_1 – полезно используемая теплота, %; q_2 – потери теплоты с уходящими газами, %; q_3 – потери теплоты с химическим недожогом топлива, %; q_4 – потери теплоты с механическим недожогом топлива, %; q_5 – потери теплоты через наружные ограждения котла, %; q_6 – потери теплоты с удаляемым из топки шлаком, %.

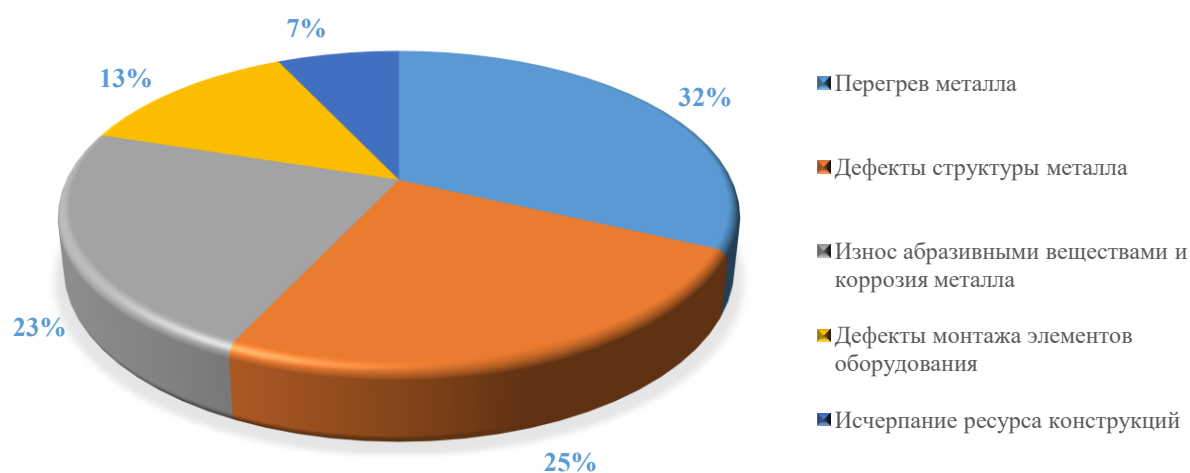


Рис. 1.3 – Причины неудовлетворительной работы твердотопливных котлоагрегатов

Таким образом, основные положения нормативной документации и используемых расчетных методик по проектированию котлоагрегатов не всегда точно определяют режимы надежной и эффективной эксплуатации котлоагрегатов. Для повышения точности инженерных расчётов следует выполнить уточнение параметров работы котлов в запыленном потоке дымовых газов, содержащих повышенную концентрацию сажистых и золовых частиц. Следует провести дополнительный анализ ряда определяющих физических и химических процессов и явлений, происходящих в ходе эксплуатации водотрубных котлоагрегатов, так как использование в тепловых расчетах рекомендуемых [89] величин термического сопротивления для учета снижения теплопередачи при загрязнении поверхностей нагрева с заданным пределом постоянных величин, найденных методами статистического анализа данных, полученных лабораторными путями на промышленном оборудовании, не может обеспечить достаточную точность расчетов, вследствие неучета ряда физических явлений, влияющих на образование золовых и сажистых отложений [53, 114]. Проведение более полного анализа физических процессов, отвечающих за образование слоя натрубных отложений и исследование зависимостей характера влияния особенностей конструкции конвективных пакетов и режимов работы на толщину слоя натрубных отложений позволит со-

здать более полную согласованную с физическими принципами модель работы теплообменного оборудования. Дополнительно проведение более широкого анализа позволит усовершенствовать существующую инженерную методику теплового расчета для конвективных пакетов, на основании которой возможно будет более точно определить величину термического сопротивления, согласовывая её с конструкцией и режимами работы оборудования [35].

1.2. Физико-химические характеристики золы и золовых отложений

Преобразование минеральных компонентов твердого топлива в золовые частицы происходит в топочных устройствах при тепловом воздействии на исходное топливо [10, 33, 103, 116, 147]. В работах [10, 33, 101] представлена схема (рис. 1.4) поэтапного преобразования частицы угольного топлива. Выгорание частицы угля состоит из следующих этапов: нагрев и сушка массы топлива с фазовым превращением гигроскопически связанной влаги и выходом ее из угольных частиц; выход летучих; горение летучих; горение коксового остатка и образование шлаковых и золовых частиц.

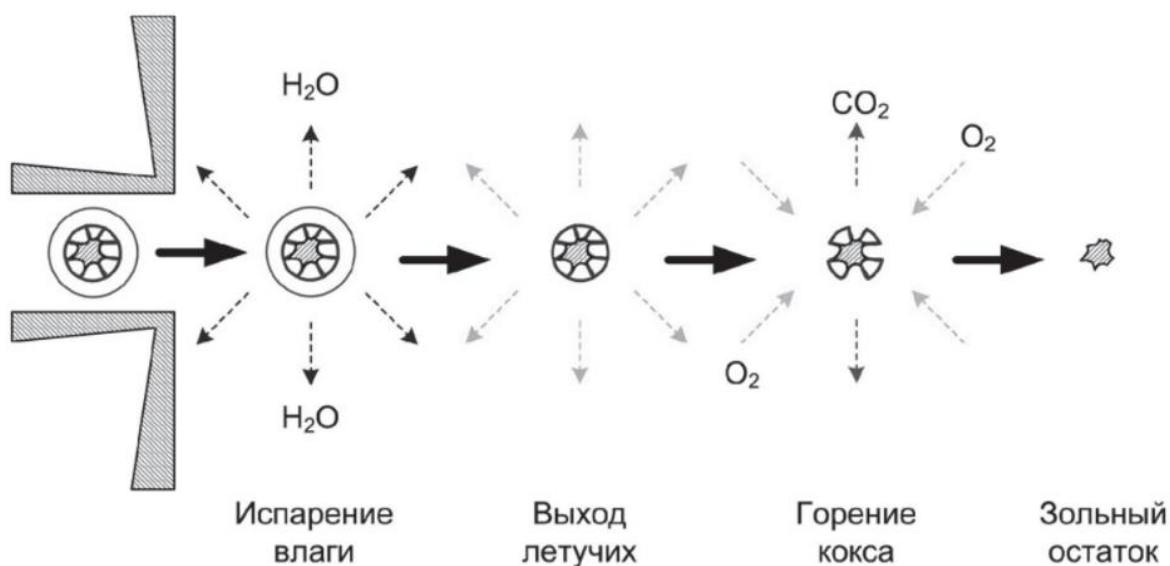


Рис. 1.4 – Стадии преобразования угольной частицы в золовую частицу при горении

Форма частиц летучей золы достаточно близка к сферической, но ни одна из частиц не обладает гладкой поверхностью, а представляют собой рыхлую гетерогенную кристаллическую структуру (рис. 1.5) [15, 123].

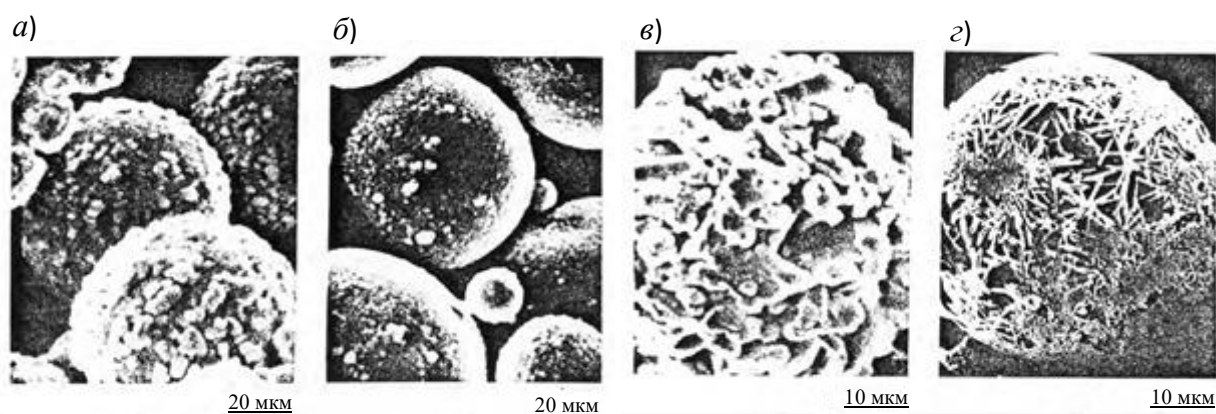


Рис. 1.5 – Изображения структуры поверхности золовых частиц разного размера при их увеличении: *а)* – сульфатные частицы субмикронного размера на поверхности более крупных золовых частиц; *б)* – золовые частицы, очищенные от внешних поверхностных включений; *в)* – частицы кристаллического кварца; *з)* – частицы игольчатого муллита

Крупные частицы золы рождаются из минеральных зерен в угольных частицах, а распределение их размеров зависит от характеристик угля, предварительной обработки угля перед подачей в зону горения и условий горения. Субмикронные частицы золы возникают в основном из гомогенного зародышеобразования с последующей коагуляцией неорганических веществ, испаряемых при горении [120, 122]. Твердые частицы неправильной формы оказывают на поверхность трубок более сильный абразивный износ, чем сферические частицы золы. Установлено, что угловатые (несферические) частицы золы более чем в 10 раз активнее утоняют стенки металла труб, чем округлые частицы [123]. Структура отложений весьма неравномерна, поскольку образована комбинациями крупных и мелких частиц [123].

По фотоматериалам, размещенным в работе [71] можно получить данные и по другим особенностям внешней формы и размеров твердых частиц, влияющих на движение частиц. Например, экспериментально установлено, что частицы базальта в результате взаимодействия между самими частицами и стенками труб выступающие неровности поверхности частиц приняли более округлые формы, что приводит к изменению их среднего размера.

В работе [120] упоминается о снижении поглощательной способности начального слоя загрязнений, состоящего преимущественно из субмикронных (размер менее 1 мкм) частиц. Утверждается, что мелкие частицы в большей степени отражают падающий на поверхность поток излучения, тогда как крупные частицы показывают высокую поглощательную способность.

Структура частиц золы, в основном, зависит от состава исходного топлива (размера, формы и распределения неорганических веществ), конструкции и режимных параметров топочного устройства (габаритов топки, размера кусков твердого топлива, тепловых условий сжигания, стехиометрических соотношений и активности процессов горения) [120].

В работах [34, 49, 73, 135] приведена общепринятая классификация натрубных отложений золы по механизму их образования, а также представлена краткая характеристика условий образования, при которых каждый тип золовых отложений может образоваться.

1. *Сыпучие золовые отложения*: образуются из механически сцепленных друг с другом и с металлом труб золовых частиц. В этом случае форма отложений обычно повторяет аэродинамический профиль поля скорости установившегося потока дымовых газов в конвективном пакете.

2. *Шлаковые золовые отложения*: образуются из выпавших на высокотемпературные поверхности нагрева, размягченных (находящихся в пластичном состоянии) или жидких (находящихся в расплавленном состоянии) золовых частиц [146]. Отложения данного типа проявляют высокий темп роста на поверхности труб, расположенных в высокотемпературной зоне омывания.

3. *Связанные золовые отложения*: образуются из спекшихся друг с другом и с металлом труб золовых частиц под воздействием химических реакций, тепловых напряжений и давления дымовых газов. Связанные золовые отложения по прочности сцепления между частицами подразделяются на плотные и рыхлые [34].

4. *Связанно-шлаковые золовые отложения*: образуются из одновременно находящихся в зоне образования загрязнений частиц золы в разном агрегатном состоянии (твердые, жидкие и размягченные золовые частицы) и участвующих в химических процессах спекания под действием теплоты и давления дымовых газов в высокотемпературных зонах.

В результате исследований различными авторами были определены коэффициенты теплопроводности для слоя золовых отложений согласно выше представленной классификации [34, 49, 73, 135]: для сыпучих золовых отложений – $\lambda = 0,1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, для связанно-шлаковых отложений – $\lambda = 1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$, для шлаковых отложений – $\lambda = 2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$. Сравнивая теплопроводность отложений с теплопроводностью металла труб $\lambda = 36 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ получается, что примерно в 450 раз теплопроводность стали превышает теплопроводность золовых отложений. Дополнительно следует отметить, что значения коэффициентов теплопроводности золовых отложений являются не постоянными величинами. Они изменяются в зависимости от температуры слоя, где с ее увеличением коэффициенты теплопроводности возрастают [135].

Частицы загрязнений с высокой плотностью имеют более высокую вероятность удара о поверхность труб в конвективных пакетах, чем частицы с меньшей плотностью того же размера. Явление связано с тем, что более плотные частицы обладают большей инерцией, имеют большую массу и более высокое значение числа Стокса [123, 150].

Среди свойств угольного топлива следует выделить такую важную характеристику вещества, входящего в состав минеральной части топлива – температура начала процесса налипания на наружную поверхность конвективных труб золовых частиц, находящихся в размягченном виде (процесс шлакования труб). При достижении этой температуры дымовых газов и дальнейшем её росте в котлах наступает процесс быстрого образования вторичных отложений с возрастающим набором прочности уже имеющихся первичных отложений

[13]. Все виды углей разведанных угольных месторождений России при сжигании в топочных устройствах образуют золу с высокой степенью шлакуемости [23].

Скорость процессов шлакования поверхностей труб пучка пропорциональна вероятности налипания расплавленных частиц на металл труб [93].

Частицы золы в размягченном (пиропластическом) состоянии за счет своей высокой адгезионной способности могут активно закрепляться на поверхности конвективных труб, и сцепляться со слоем уже образовавшихся отложений. После закрепления размягченных частиц золы на поверхности слоя из рыхлых частиц происходит переход налипших частиц из размягченного в твердое состояние, усиливающее упрочняющее действие на поверхности слоя рыхлых отложений. Присутствие в слое отложений частиц находящихся в пиропластическом состоянии активно увеличивает количество зацепившихся частиц золы, интенсифицируется рост вторичных отложений, в то же время снижается число нейтральных частиц, которые могут быть выбиты из слоя динамическим воздействием более крупных частиц золы, имеющих значительную кинетическую энергию.

Шлакующие частицы при движении в газовом потоке по мере снижения температуры дымовых газов обычно превращаются в твердые частицы. Однако, часть из них, особенно те, которые состоят из неорганических компонентов с низкой температурой плавления, не могут превратиться в твердые частицы [123]. Основная трудность при проектировании котлов заключается в достижении высокой степени выгорания топлива при температурах ниже температуры размягчения золы [120].

Наружная поверхность плотного связанного типа золовых натрубных отложений выглядит как сглаженные гребни с верхним краем, направленным в противоположную сторону движения потока дымовых газов [34, 56].

Авторы [56, 111, 135] исследовали строение натрубных отложений золы и обнаружили ярко выраженное послойное разделение структуры золовых отложений, состоящих из поверхностного слоя (омываемого продуктами сгорания), нескольких промежуточных слоев и внутреннего слоя (соприкасающегося с поверхностью конвективных труб). Внутренний слой обычно краснокоричневатого оттенка [103, 112] имеет толщину 1–1,5 мм на боковых поверхностях труб и 3–4 мм в центральной части тыльной поверхности трубы. Один или несколько промежуточных слоев отложений имеют землянисто-серый либо оранжевый оттенок цвета и занимает большую часть толщины натрубных отложений. Поверхностный слой серого цвета [112], коричневого цветового оттенка [103] подвержен соприкосновению с летящими твердыми частицами, вызывающими абразивный износ поверхностного слоя отложений, поэтому на нем остаются множественные продолговатые кратеры глубиной до 1 мм [56].

Вследствие того, что отложения имеют слоистую структуру, препятствующую проникновению продуктов сгорания к корню гребней, по высоте отложений изменяется степень их сульфатизации (повышение прочности связей между частицами в слое, являющихся следствием протекания реакций между золой и оксидами серы). Чем ближе к поверхности труб находится слой, тем степень сульфатизации золовых отложений становится меньше. Так как степень сульфатизации зависит от продолжительности контакта золовых отложений с омывающим их потоком продуктов сгорания, то скорость увеличения размеров гребня поверхностного слоя золовых отложений при приближении к максимальному значению сульфатизации слоев отложений может уменьшиться настолько, что высота отложений станет величиной постоянной [56].

Состав топлива, а также образующиеся при обжиге новые химические соединения минеральной части сжигаемого топлива увеличивают способность золы к спеканию и появлению в котлах химических соединений, имеющих

низкую температуру плавления, которые могут привести к активности образования шлаковых, связанных и связанно-шлаковых натрубных отложений [13].

Пластические свойства золы могут оказывать значительное влияние на образование отложений на поверхностях нагрева котлов, особенно заметно это становится при образовании связанно-шлаковых золовых отложений. На рис. 1.6 приведены зависимости кажущейся вязкости (вязкость, находящейся в зависимости от напряжения сдвига) золы в пиропластическом (размягченном) состоянии от ее температуры, образовавшейся после сжигания некоторых видов углей. Вероятность налипания на стенки конвективных трубок шлакующих частиц определяется отношением значения вязкости (не находящейся в зависимости от напряжения сдвига) частицы золы, при которой она обладает адгезионным свойством (слипаемостью) с другими объектами к значению эффективной (кажущейся) вязкости частицы золы.

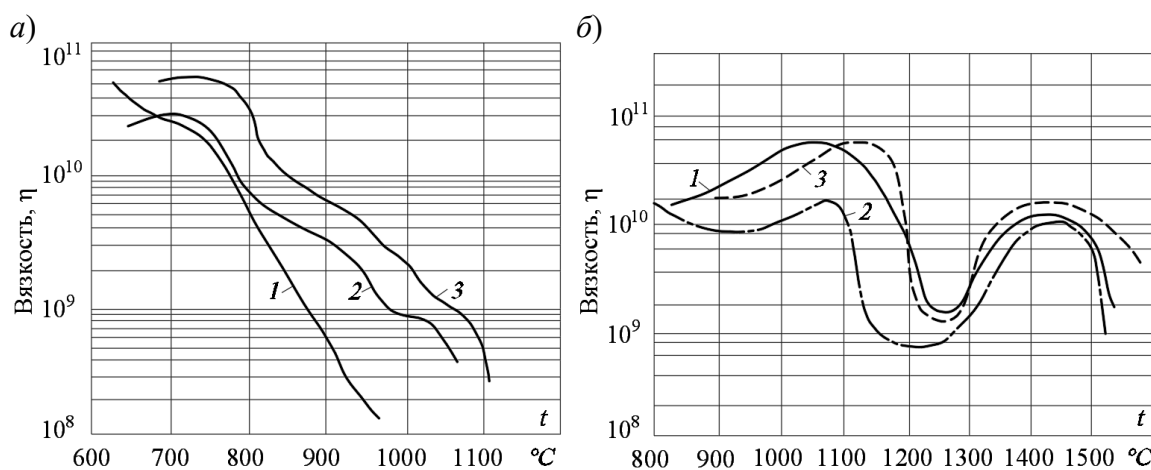


Рис. 1.6 – Зависимости кажущейся вязкости золы от температуры для: а) – назаровского угля с содержанием оксида кальция в золе: 1 – 22,5 %; 2 – 30,3 %; 3 – 40,0 %;
 б) – эстонских горючих сланцев с содержанием оксида кальция в золе:
 1 – 40,16 %; 2 – 42,27 %; 3 – 43,90 %.

Из рис. 1.6 видно, что тенденции изменения кажущейся вязкости (вязкости при данном напряжении сдвига (трения, преодолеваемого при скольжении одного слоя относительно другого)) у разных видов углей сильно различаются.

Важным моментом является выявленная разница в химическом и минералогическом составах (содержании различных компонентов) летучей золы и золы, из которых состоят натрубные отложения [56, 122, 135]. Например, зафиксировано превышение в летучей золе содержания SO_3 до 200 раз, оксидов кальция до 2,3 раза, магния до 2,1 раза, железа до 3,4 раз в сравнении с содержанием этих элементов в натрубных отложениях золы. Такие значительные отличия объясняются протекающими процессами упрочнения слоя путем сульфатизации и спекания осадившихся слоев золы воздействием гидродинамических сил потока запыленных продуктов сгорания, омывающего конвективные трубы. Степень сульфатизации золовых отложений имеет обратную линейную зависимость от высоты образовавшегося слоя золовых отложений. Так же в работе [135] обнаружены различия в излучательной способности у летучей золы и золы в слое золовых отложений. У сыпучих золовых отложений небольшой толщины излучательная способность поверхности слоя меньше, что свидетельствует о том, что большее количество теплоты будет отражаться от поверхности слоя отложений, снижая тем самым тепловую эффективность работы конвективных поверхностей нагрева котлов.

1.3. Физико-химические характеристики сажи и сажистых отложений

В процессе горения любого вида углеводородного топлива (твердого, жидкого, газообразного) в области пламени [9] может происходить образование сажистых частиц (дисперсного аморфного углерода [20, 83]) являющихся продуктом топочной агломерации частиц углерода, возникающих вследствие неравномерного распределения окислителя в реакционной зоне с локализацией в топочном объеме зон с его недостатком. Полнота сгорания топлива в топках затрудняется по множеству причин, среди основных можно выделить: несовершенство организации механизмов топливоподачи твердых видов топлива или распыливания жидкого топлива; несовершенство процессов образования топливовоздушной смеси и процессов выгорания топливных частичек за время нахождения их в зоне горения [24].

В пламени при горении топлива размеры образующихся сажистых частиц находятся в диапазоне от 1 до 1000 нм, но анализ фотосъемки частиц сажи (рис. 1.7) показал, что наиболее распространёнными являются частицы со средним размером 18–40 нм [9, 16, 76]. В работе [16] была определена концентрация сажистых частиц для пламени с оптической длиной 0,5 см и принятом допущении, что подогретая зона пламени является монодисперсной системой. Концентрация сажистых частиц оказалась равна $2 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и соответствует массе сажистых частиц менее 1% от общего веса компонентов в зоне горения. Во время работы водотрубного котла КВ-1,6-95ШП на высокореакционном каменном угле с нагрузкой 75% от номинальной, удельный выброс (эмиссия) сажистых частиц составила 1,612 г/кг топлива, что в пересчёте на количество выработанной теплоты – 78,52 г/ГДж по данным исследований, представленным в работе [60]. В работе [60] приведены аналогичные данные для котла ДКВр-4,0-13, работающем на высокосернистом мазуте с нагрузкой 70% от номинальной, где удельный выброс (эмиссия) сажистых частиц составила 2,074 г/кг топлива, что в пересчёте на количество выработанной теплоты – 52,94 г/ГДж.

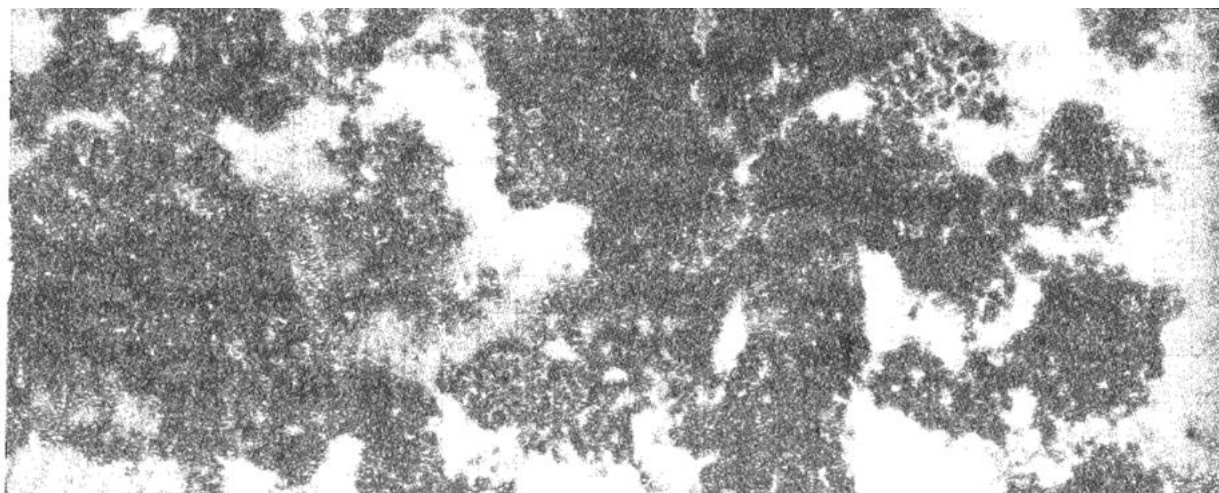


Рис. 1.7 – Изображение скопления сажистых частиц при увеличении объекта в 42 000 раз

Сажистые частицы могут быть самых разных геометрических форм: сферической, овалоидальной, цепочкообразной, хлопьевидной, кружевидной, нитевидной и других форм [9, 15]. Существует предположение, что сажистые

частицы имеющие формы, отличающиеся от сферической, представляют собой результат агломерации сферических частиц сажи малого размера в большие системы вторичных образований.

В работах [9, 48, 76] приводятся результаты химического анализа частиц сажи: 94–99 % углерода, 0,5–3,0 % водорода, незначительное количество кислорода и золовых элементов в составе твердых частиц. Соотношение количества атомов углерода к количеству атомов водорода для сажистых частиц принимает значения от 3 до 15. Большее количество водорода содержится в частицах сажи на ранней стадии процессов сажеобразования («молодая сажа»). Содержание водорода в частицах сажи влияет на плотность частиц, которая может принимать значения в диапазоне $(1,8–2,0) \cdot 10^3$ кг/м³. Анализ физико-химических свойств сажистых частиц показывает высокую способность сажи к процессам адсорбции [9, 76, 83] (до 30 % собственной массы частицы сажи) поверхностью легких и канцерогенных углеводов.

Внутреннее строение отдельной частицы сажи представляется структурой (рис. 1.8), где атомы углерода, входящие в состав сажистых частиц, находятся в вершинах плоского правильного шестиугольника (гексагона) [9, 48, 76]. Расстояние между вершинами гексагона, в которых размещаются атомы углерода, составляет $\approx 0,142$ нм. Гексагоны из атомов углерода сопряжены между собой и тем самым образуют плоский мономолекулярный слой [90]. Два расположенных друг над другом слоя на расстоянии от 0,345 до 0,370 нм гексагонов объединяются в пластину, а объединение нескольких пластин (от 2 до 10 с общей толщиной до 3 нм) в одну общую структуру приводит к появлению кристаллита сажи, из которых и состоит видимая частица. Например, частица сажи сферической формы размером 20 нм может содержать примерно 10^3 кристаллитов в гексагональных решетках, похожих на бензольные кольца аренов, и около миллиона атомов углерода.

Долгоживущие сажистые частицы с небольшим количеством водорода в своем составе обладают более упорядоченной и стабильной внутренней

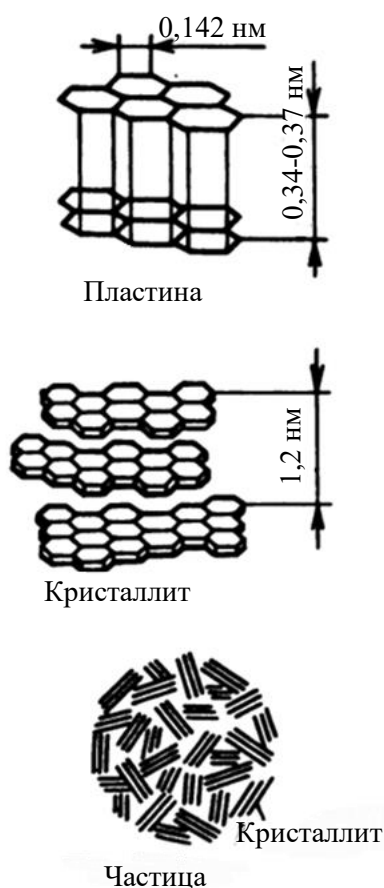


Рис. 1.8 – Строение частицы сажи на разных уровнях образования

структурой по сравнению с «молодой сажей», что объясняется большим временем нахождения в высокотемпературной зоне пламени, за которое частица сажи успевает частично изменить свою внутреннюю структуру, упорядочивая слои [9].

Физико-химические модели сажеобразования и их математические модели описания процесса сажеобразования подробно рассмотрены в работах [9, 64, 76, 83, 90, 101].

Анализ публикаций разных авторов свидетельствует о предпочтении физико-химической модели радикально-цепного механизма сажеобразования [24, 72]. Рассмотрены сокра-

щенные механизмы горения углеводородного топлива [52].

На рис. 1.9 приведена составленная авторами работ [9, 90] принципиальная блок-схема процессов, происходящих в пламени при горении углеводородного топлива с образованием сажистых частиц.

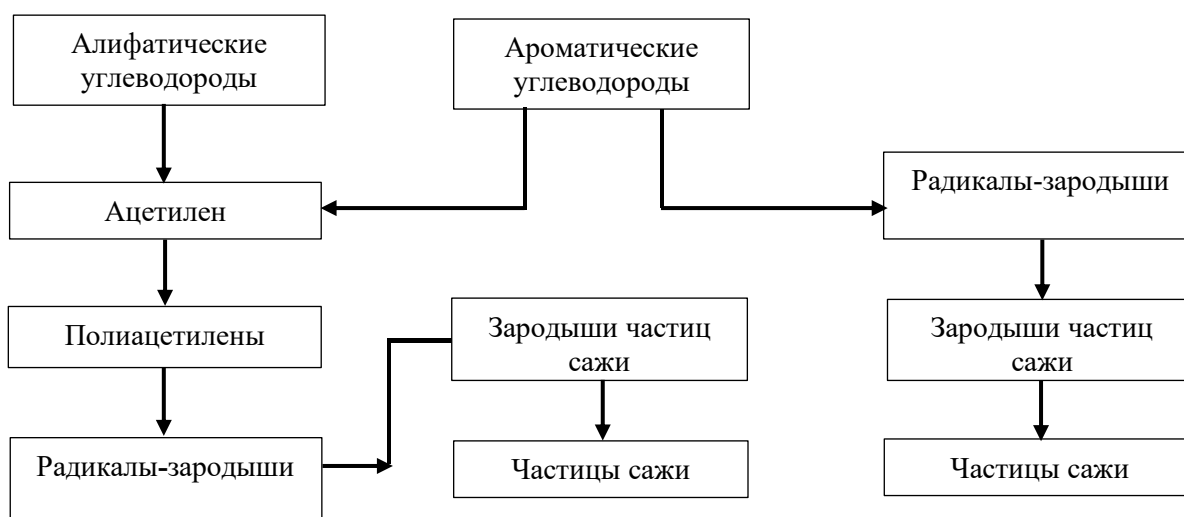


Рис. 1.9 – Принципиальная блок-схема процессов сажеобразования по радикально-цепному механизму

Так же стоит отметить, что процесс сажеобразования в топочных устройствах характеризуется некоторым временем (период индукции [106] $\tau_{\text{инд}}$, рис. 1.10), которое необходимо для протекания определенного механизма по образованию сажистой частицы, где процесс сажеобразования ограничен порогами концентрации образующихся твердых частиц.

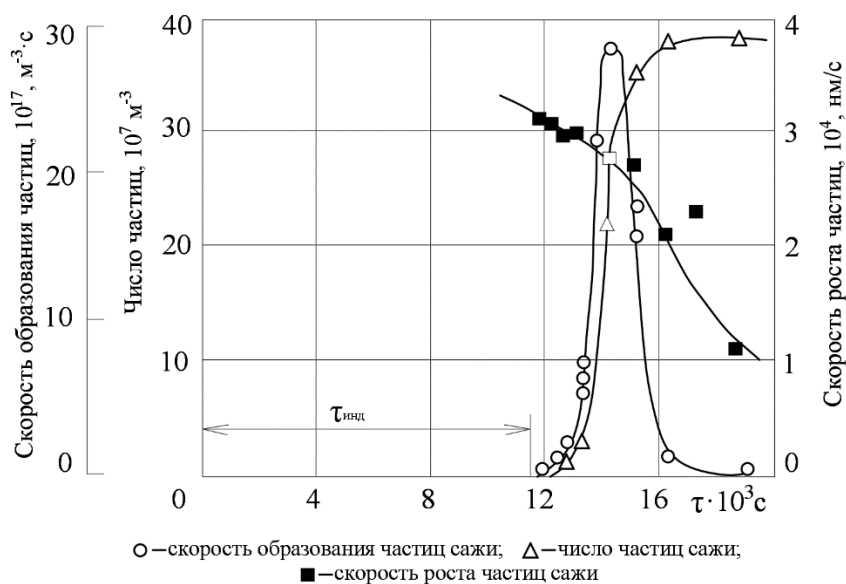


Рис.1.10 – Зависимость протекания физико-химической реакции образования сажи при термическом разложении вещества C_7H_8

В ходе анализа экспериментальных данных авторами [24, 72] были выявлены пороговые концентрации окислителя, при которых начинается процесс активного выделения сажистых частиц из зоны горения в зависимости от температуры пламени, условий подачи топлива и дисперсности его распыливания [64].

1.4. Физические основы влияния сил, действующих на твердые частицы в газовом потоке

Аналитическое исследование движения частиц в потоке газа было проведено ранее различными авторами, в том числе Кашеевым В.М. и Мурановым Ю.В. [45], Федотовским В.С. и Сабелевым Г.И. [92], Лугумановым Т.Т. и Кулешовым В.С. [59] и др.

Основными действующими силами, оказывающими воздействие на движущиеся твердые частицы в турбулентном потоке газа, являются силы вязкого трения и силы сопротивления среды, которые заставляют частицы следовать за потоком газа. Другие виды физического воздействия на частицу, такие как сила тяжести, центробежная сила, негидродинамические (электростатическая, диффузиофоретическая, термофоретическая) силы и турбулентные колебания потока также оказывают значительную роль в воздействии на активность движения частиц [59, 113, 123, 130, 140, 150].

Силы тяжести. Влияние внешнего силового поля на частицу подчиняется зависимости [45, 59]:

$$\vec{F}_G = m_p \vec{g}, \quad (1.1)$$

где m_p – масса движущейся твердой частицы, кг; g – ускорение свободного падения, м/с².

Гравитационное осаждение в большей степени оказывает влияние на крупные частицы, обладающие значительной массой, у которых величина силы гравитации больше силы сопротивления движению потока продуктов сгорания, чем у частиц небольшого размера [106, 130].

Поскольку поверхность круглых труб является изогнутой, гравитационные силы способствуют осаждению частиц, когда они находятся в области за тыльной стороной трубок. С другой стороны, гравитационные силы препятствуют осаждению частиц, когда они находятся перед лицевой стороной трубок [151].

Перемещение и осаждение частиц, находящихся под силовым воздействием гравитационного поля, является случайным (стохастическим) процессом, так как частицы во время своего осаждения из потока совершают совместно с пульсациями потока хаотичные спуски и подъемы [69].

Центробежные силы. Оказывают воздействие на движущуюся частицу в газовом потоке с криволинейной траекторией движения, свойственной дви-

жению продуктов сгорания в стесненных условиях, наблюдающихся в конвективных пакетах, и может отклонять частицу к краю движущегося потока газовой среды [117]. Центробежные силы определяются по уравнению [59]:

$$\vec{F}_c = m_p \vec{\omega}^2 B = \frac{\pi \rho_p d_p^3 v_\theta^2}{6B}, \quad (1.2)$$

где m_p – масса частицы, кг; ω – угловая скорость частицы, рад/с; B – радиус вращения частицы, м; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; d_p – диаметр частицы, м; v_θ – касательная составляющая скорости частицы.

Силы сопротивления среды. Оказывают тормозящее воздействие на движущиеся частицы в газовом потоке и определяются уравнением [59]:

$$\vec{F}_D = \frac{C_D \rho_r S (\vec{v}_r - \vec{v}_p)^2}{2}, \quad (1.3)$$

где C_D – коэффициент сопротивления частицы; ρ_r – плотность газовой среды, кг/м³; S – поперечное сечение частицы, м²; v_r – скорость газовой среды, м/с; v_p – скорость частицы, м/с.

Силы вязкого сопротивления. Возникают при движении частицы в потоке газовой среды с собственной скоростью относительно этой газовой среды. Для частицы со сферической формой наружной поверхности силу вязкого сопротивления можно вычислить по формулам, представленным в работе [45].

Классифицируют группу сил, возникающих от неравномерного распределения поверхностного давления действующей по периметру частицы во время её движения в газовом потоке [45].

Сила Архимеда. Определяется в общем случае для вращающейся движущейся частицы по уравнению [45, 59, 65]:

$$\vec{F}_A = \frac{m_f v_\theta^2}{B} + m_f \vec{g} = \rho_r V_p \vec{g}, \quad (1.4)$$

где ρ_{Γ} – плотность газовой среды, кг/м³; V_p – удельный объём частицы, м³/кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; m_f – масса газовой среды, вытесненной находящейся в ней частицей, кг; B – радиус вращения частицы, м; v_{θ} – касательная составляющая скорости частицы, м/с².

Сила, возникающая из-за изменения величины давления в направлении движения транспортирующей твердую частицу газового потока из-за увеличения скорости потока. Может быть определена по следующему уравнению [45]:

$$\vec{F}_{\text{уск}} = \rho_{\Gamma} V_p \frac{d\vec{v}_{\Gamma}}{d\tau}, \quad (1.5)$$

где ρ_{Γ} – плотность газовой среды, кг/м³; V_p – удельный объём частицы, м³/кг; v_{Γ} – скорость потока газа, м/с; τ – время, с.

Сила, возникающая из-за неравномерного распределения статического давления газовой среды (сила градиента давления) в проходном сечении газохода. Например, для турбулентной вихревой области свойственны минимальные значения сил статического давления. Градиент давления газовой среды может быть определен по зависимости [45, 59, 117]:

$$F_p = \frac{m_p}{\rho_{\Gamma}} \nabla p, \quad (1.6)$$

где p – давление газовой среды, Па; m_p – масса частицы, кг; ρ_{Γ} – плотность газовой среды, кг/м³.

Гидродинамическая сила Магнуса. Возникает из-за разности скоростей газовой среды в различных точках наружной поверхности (рис. 1.11), транспортируемой в этой среде вращающихся твердых частиц и перепада статического давления в разных точках наружной поверхности частиц вследствие этого вращения [45, 59, 117]. Из-за возникновения разности давлений в разных

точках поверхности частицы возникает подъемная сила с направлением действия, перпендикулярным вектору скорости потока среды, окружающей частицу.

Гидродинамическая сила Магнуса определяется по выражению:

$$\vec{F}_{Mag} = \frac{\pi}{8} \rho_{\Gamma} C_{Mag} d_p^2 (\vec{v}_{\Gamma} - \vec{v}_p)^2, \quad (1.7)$$

где ρ_{Γ} – плотность газовой среды, кг/м³; C_{Mag} – коэффициент подъемной силы; d_p – диаметр частицы, м; v_{Γ} – скорость газовой среды, м/с; v_p – скорость частицы, м/с.

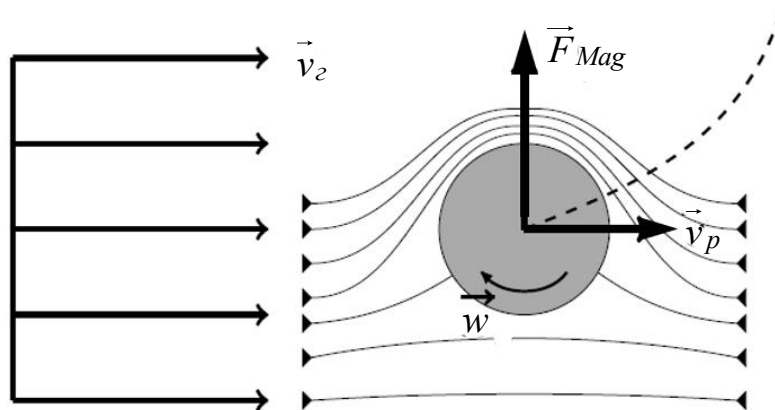


Рис. 1.11 – Схема воздействия гидродинамической силы Магнуса на движущуюся в потоке частицу [59]

К причинам неравномерного обтекания газовой средой поверхности твердой частицы относят вращательное движение твердой частицы в потоке газа, движение частицы в области потока с поперечным градиентом скорости [45].

Так же классифицируют группу сил инерции, возникающих вследствие нестационарного движения твердой частицы в газовой среде [45].

Сила, равноценная воздействию присоединённой массы [1, 45, 59, 117, 119]:

$$\vec{F}_{VM} = \frac{1}{2} C_v \rho_{\Gamma} m_p \left(\frac{d\vec{v}_{\Gamma}}{dt} - \frac{d\vec{v}_p}{dt} \right), \quad (1.8)$$

где C_v – коэффициент присоединенной массы; ρ_r – плотность газовой среды, кг/м³; m_p – масса частицы, кг; v_r – скорость газовой среды, м/с; v_p – скорость частицы, м/с.

Сила присоединенной массы указывает на рост инерции частицы при её нестационарном движении в газовой среде. Эффект присоединенной массы тела появляется от инерционности молекул газовой среды, которым твердая частица во время движения придает дополнительное ускорение. Так как общий импульс сохраняется, это приводит к замедлению движения частицы. Этот эффект можно представить как движение некой дополнительной виртуальной массы (присоединённой массы) к твердой частице, которая движется в потоке газа с такой же относительной скоростью [45, 59].

Сила Бассе. Сила проявляется как дополнительное сопротивление движению твердой частицы со стороны газового потока из-за увеличения относительной скорости твердой частицы и соответственно ее силы инерции [45, 59, 117]:

$$\vec{F}_B = -6r_p^2 \sqrt{\pi\rho_r\mu_r} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (\vec{v}_r - \vec{v}_p) \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}, \quad (1.9)$$

где r_p – радиус частицы, м; ρ_r – плотность газовой среды, кг/м³; μ_r – коэффициент динамической вязкости газовой среды, Па·с; t – время движения частицы, с; τ – время, с; v_r – скорость газовой среды, м/с; v_p – скорость движущейся частицы, м/с.

Сила Мещерского. Сила, возникающая при изменении массы частицы. Сила Мещерского может быть определена по зависимости:

$$\vec{F}_{\text{реак}} = \vec{v}_{\text{от}} \frac{dm_p}{d\tau}, \quad (1.10)$$

где $\vec{v}_{\text{от}}$ – скорость присоединенной массы относительно частицы, м/с; $\frac{dm_p}{d\tau}$ – скорость изменения массы частицы.

Турбофоретическая сила. Процесс турбофоретического осаждения включает перенос массы из области высокой турбулентности в область с низкой турбулентностью. В момент прохождения турбулентных пульсаций скорости основного газового потока, транспортирующего твердые частицы, сами частицы также начинают совершать колебательные смещения во время своего движения в потоке газа [92]. Скорость турбофоретического осаждения (V_t , м/с) рассчитывается по формуле [151]:

$$V_t = -\tau_p \frac{d \overline{(v'_p)^2}}{ds}, \quad (1.11)$$

где τ_p – время релаксации частицы в потоке газа, с [79]; $\overline{(v'_p)^2}$ – среднеквадратичная скорость частицы, м²/с²; s – расстояние от частицы до поверхности осаждения, м.

Выявлено накопление в больших масштабах твердых частиц в зонах с малой турбулентностью потока продуктов сгорания рядом со стенками труб, которое объясняется действием явления турбофореза [40, 128]. Также установлено существование нескольких режимов осаждения твердых частиц малого размера, такие как диффузионный, конвективный, инерционный, определяемые в зависимости от скорости выпадения частиц из газового потока [117].

Силу турбофореза можно не учитывать в уравнениях движения твердых частиц, так как на частицы большого размера не оказывают влияние мелко-масштабные турбулентные пульсации.

Термофоретическая сила (термофорез). Движение частиц, возникающее в результате наличия теплового градиента, обеспечивает основную движущую силу субмикронных частиц в газовом потоке, содержащем градиент температуры, и играет значительную роль в осаждении частиц малого диаметра (менее 2 мкм). Эта сила молекулярного происхождения, создающая упорядоченное перемещение частиц, действует в направлении, противоположном

градиенту температуры (от высокотемпературной зоны газа к низкотемпературной) (рис. 1.12) [106, 111, 117, 146, 150]. Влияние термофореза становится значимым в областях с низкой скоростью потока продуктов сгорания рядом со стенками конвективных трубок, обычно имеющих более низкую температуру в сравнении с греющими газами [130, 144].

Термофорез может быть объяснен различной бомбардировкой поверхности частиц молекулами газа. Молекулы газа обладают более высокой кинетической энергией на горячей стороне частицы по сравнению с холодной стороной. Более высокая кинетическая энергия столкновений молекул с поверхностью горячей частицы приводит к суммарному усилию, действующему на частицу в направлении холодного потока.

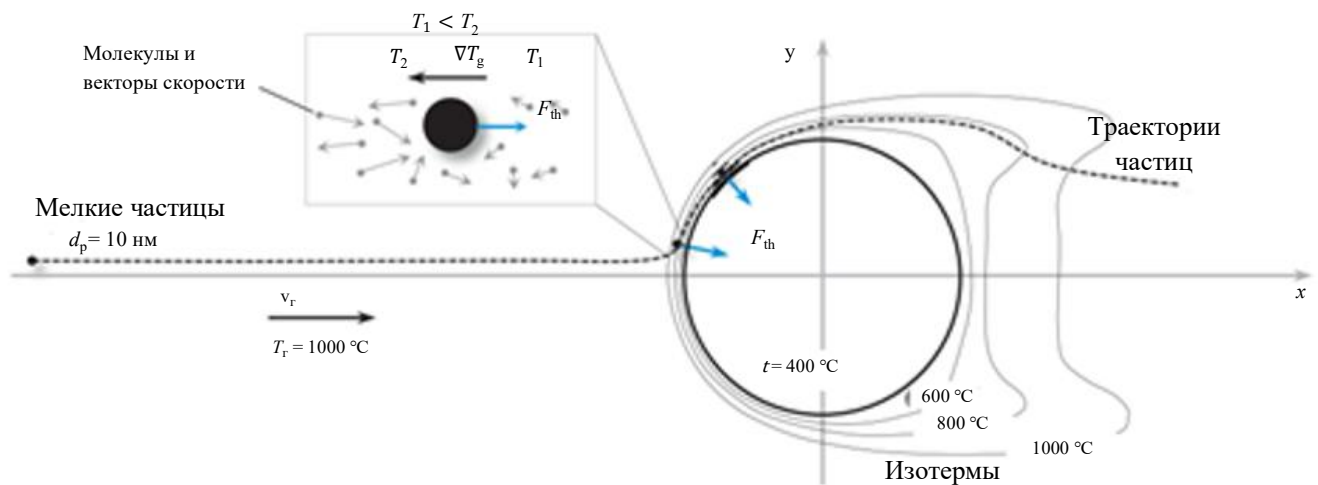


Рис. 1.12 – Схема воздействия термофоретической силы на частицы в пограничном слое у стенки трубы

Существует ряд исследований, указывающих на доминирующую роль термофореза в осаждении частиц в диапазоне диаметров $0,1 < d_p < 10$ нм [150]. Скорость соударения увеличивается в 1000 раз для частицы размером 1 нм, когда температура стенки на 20 % ниже температуры омывающего ее потока.

Фактически, термофоретическая сила играет главную роль на начальном этапе образования отложений, поскольку существует высокий градиент температуры между дымовыми газами и поверхностями нагрева [63, 120, 123]. Однако, термофоретическая сила уменьшается по мере увеличения толщины слоя отложений и приближении температуры поверхности осажденного слоя загрязнений к температуре омывающего его газового потока [146, 150].

Безразмерное выражение термофоретической силы F_{th} приведено в исследовании [120, 150]:

$$\frac{F_{th}\rho_{\Gamma}}{\mu_{\Gamma}^2} = \Phi \frac{d_p \nabla T_{\Gamma}}{2T_{\Gamma}}, \quad (1.12)$$

где ρ_{Γ} – плотность газовой среды, кг/м³; μ_{Γ} – динамическая вязкость газовой среды, Па·с; T_{Γ} – температура газовой среды, К; ∇T_{Γ} – градиент температуры в газовой фазе в месте нахождения частицы, в случае если частица отсутствует [111]; Φ – термофоретический коэффициент [150]; d_p – диаметр частицы, м.

Термофоретический коэффициент является функцией газокINETического режима движения частиц (числа Кнудсена (Kn)) и отношения теплопроводности частиц и газа [150]. Свойства газа рассчитываются для того места в пространстве, где находится частица, в случае если бы частицы там не было. Число Кнудсена определяется как отношение средней длины свободного пробега молекул (λ , м) потока газа к радиусу частицы в соответствии с уравнением [63, 116, 117, 120, 150]:

$$\text{Kn} = \frac{2\lambda}{d_p}, \quad (1.13)$$

С повышением температуры газа средняя длина свободного пробега увеличивается, что приводит к увеличению числа Кнудсена. Число Кнудсена варьируется от низких значений для крупных частиц до высоких значений для субмикронных частиц. Таким образом, субмикронные частицы не следуют закону сопротивления Стокса, а коэффициент теплопроводности не влияет на термофоретическую силу.

Инерционное соударение. Воздействие сил инерции часто упоминается как доминирующий механизм, приводящий к ускоренному образованию отложений [116, 124, 140, 144, 150]. Когда частицы загрязняющих веществ вылетают из области своего формирования, они могут иметь начальную скорость, отличающуюся от фонового поля скоростей потока продуктов дымовых газов. Эта разница скоростей заставляет частицы пересекать линии тока в потоке продуктов сгорания [146]. На рис. 1.13 показан процесс инерционного удара [150].

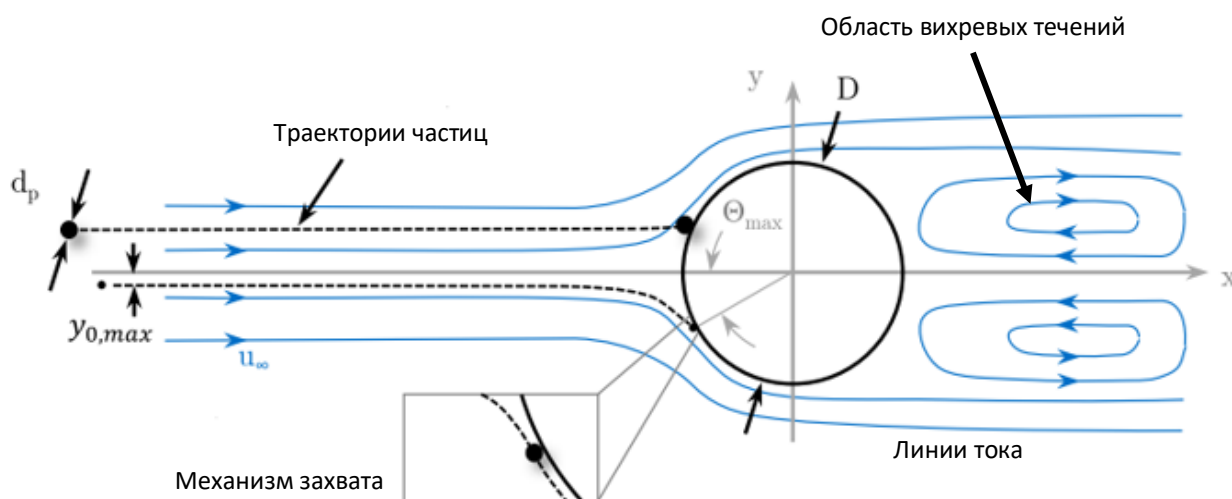


Рис. 1.13 – Схема соударения инерционных частиц с круглой трубкой в поперечном потоке газа

Частицы, приближающиеся к трубке, не могут следовать изгибу линий тока из-за большой массы, которая заставляет их в процессе движения сохранять текущее направление траекторий [120]. Таким образом, силы инерции частиц превышают аэродинамические силы движения газового потока.

Инерционное соударение описывается эффектом, заключающимся в том, что более крупные частицы летучей золы ($d_p > 10$ нм) обладают достаточной инерцией для преодоления эффекта обтекания трубок по линиям тока газовой среды вокруг трубок и, таким образом, ударяются в них [111, 120, 124, 133, 140, 146, 150]. Это поведение обычно выражается числом Стокса, которое

определяется как отношение времени релаксации частиц τ_p к характерной шкале времени потока τ_Γ [150]:

$$St = \frac{\tau_p}{\tau_\Gamma} = \frac{\rho_p d_p^2 u_\infty}{9\mu_\Gamma D}, \quad (1.14)$$

где τ_p – времени релаксации частиц, с; τ_Γ – характерная шкала времени потока, с; ρ_p – плотность частицы, кг/м³; μ_Γ – динамическая вязкость, Па·с; u_∞ – компонент скорости частицы, движущейся по направлению вдоль оси x ; D – диаметр сечения участка конвективного газотока котлоагрегата, м; d_p – диаметр частицы, м.

При малых значениях числа Стокса ($St \ll 1$) частицы находятся в состоянии, близком к равновесию скоростей с потоком транспортирующего их газа. Частицы успевают отреагировать на изменения полей скорости несущего их потока, где будут стремиться следовать по линиям тока [111, 140, 143, 150]. При больших значениях числа Стокса ($St \gg 1$) частицы не будут находиться в равновесном состоянии с полем скорости потока, в котором они находятся. Частицы практически не реагируют на изменения в потоке газа, как показано верхней пунктирной траекторией движения частицы на рис. 1.13, где будет происходить передача значительного импульса от частицы к среде [134, 140].

Число Стокса для частиц в условиях собственной работе котлов может варьироваться от крайне низких значений $St \approx 10^{-9}$ до $St \approx 60$. Инерционное соударение становится доминирующим при $St \approx 0,5$, что эквивалентно частице с размером 20 мкм [120].

Закон Стокса [70] описывает силу трения для сферической частицы в потоке с низким значением числа Рейнольдса. При малых скоростях потока сила трения является линейной функцией числа Рейнольдса. При более высоких числах Рейнольдса сила трения отклоняется от этой линейной функции.

Число Рейнольдса частиц [120] используется для нахождения эффективного числа Стокса, используя следующее критериальное уравнение:

$$\text{Re}_p = \frac{\rho_p d_p v_\Gamma}{\mu_\Gamma}, \quad (1.15)$$

где ρ_p – плотность частицы, кг/м³; μ_Γ – динамическая вязкость газовой среды, Па·с; d_p – диаметр частицы, м; v_Γ – скорость потока газа, м/с.

Эффективность соударения в зависимости от эффективного числа Стокса проиллюстрирована на рис. 1.14, а).

С укрупнением, частицы начинают ударяться о поверхность трубок, и вероятность соударения монотонно возрастает с увеличением числа Стокса. Вероятность столкновения частиц увеличивается с 8% для частиц с диаметром 12,5 нм до 35% при увеличении диаметра вдвое.

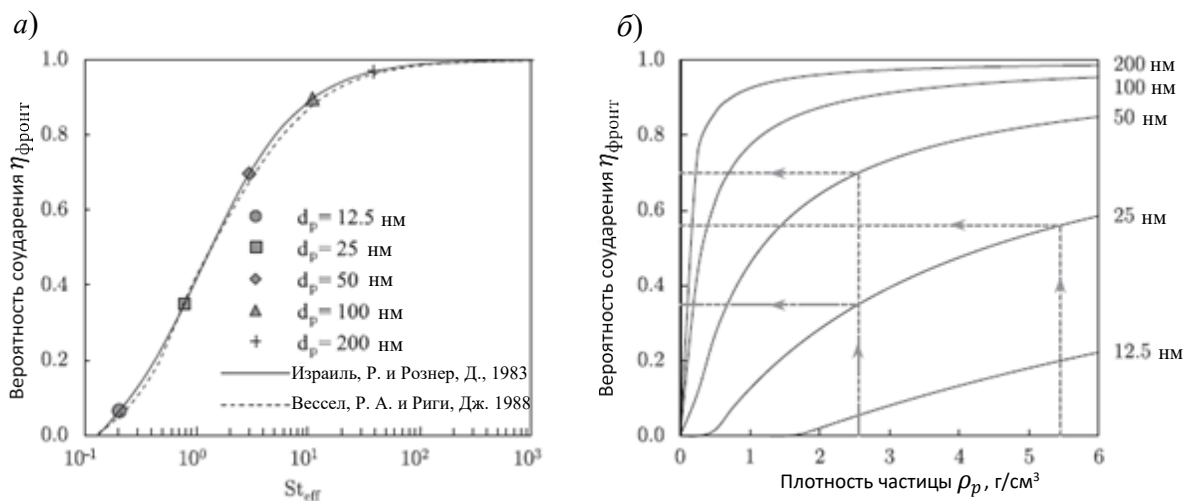


Рис. 1.14 – Вероятность соударения частиц со стенкой: а) – функция эффективного числа Стокса; б) – функция диаметра частицы d_p и плотности ρ_p .

Скорость соударения частиц наиболее высока в фронтальной части трубки при нулевом угле атаки и уменьшается по окружности вдоль стенки трубок. Соударение частиц с тыльной стороной трубки вызвано областью развитых вихревых течений вследствие обтекания потоком круглого объекта с двух противоположных сторон, которая является функцией скорости набегающего потока газа v_Γ .

Диффузия. В случае наличия заряженных частиц в потоке (ионов), молекул или субмикронных частиц механизм транспортирования частиц золи из

области их зарождения к конвективным поверхностям нагрева носит диффузионный характер. Очень мелкие частицы ($d_p \ll 1$ мкм) оседают на поверхностях нагрева за счет сил броуновской диффузии [123, 134, 140]. Авторы работ [140, 146] так же упоминают про механизм вихревой диффузии – осаждение летучей золы, обусловленного эффектами турбулентного движения потока, в котором газовые вихри приводят к утонению пристеночного слоя рядом с поверхностью омываемых трубок, тем самым, улучшая условия осаждения частиц летучей золы на поверхности трубок.

Броуновскую силу можно определить по выражению [116]:

$$F_B = \zeta \sqrt{\frac{\pi S_0}{\Delta t}}, \quad (1.16)$$

где S_0 – спектральная плотность флуктуаций скорости броуновской частицы [67]; ζ – число с Гауссовым распределением; Δt – время движения частиц, с.

В центре потока на частицы в основном действуют силы турбулентного движения потока, но при приближении частиц к стенкам трубок, доминирующей силой становится сила броуновской диффузии. Отмечается, что значимость броуновской диффузии в механизме транспортирования и осаждения частиц уменьшается с ростом размера частиц, а турбулентное перемешивание становится основным значимым явлением при приближении к стенкам конвективных трубок [134, 143].

Конденсация. Конденсация неорганических паров происходит во время охлаждения газовой среды, когда дымовые газы перенасыщаются парами, а температура газа падает ниже точки росы пара [111, 150]. Часть испаряемых компонентов может быть однородно сконденсирована с образованием субмикронного аэрозольного тумана ($d_p \ll 0,5$ мкм) и впоследствии осаждена на поверхность нагрева путем влияния сил термофореза [124]. В случае чистой поверхности трубок конденсат приводит к образованию тонкой липкой пленки, которая может влиять на улавливание твердых частиц [120, 146, 150]. Другая

часть испаряемых неорганических компонентов топлива может конденсироваться на крупных частицах летучей золы [74, 114, 123, 124].

Подъемная сила Саффмана. Сила, индуцируемая касательными напряжениями из-за неравномерного распределения поля скоростей и давлений газовой среды в поперечном направлении ее движения (рис. 1.15) [117, 119].

Силу следует учитывать в областях потока газовой среды с высокими напряжениями сдвига, например, вблизи стенки, так как эта сила может ускорить интенсивность осаждения частиц. Знак подъемной силы Саффмана зависит от направления скорости скольжения перпендикулярно стенке [59, 120, 136]:

$$\vec{F}_S = 1,615 \sqrt{\nu_r} d_p^2 (\vec{v}_r - \vec{v}_p) \sqrt{|\dot{\gamma}|} \operatorname{sgn}(\dot{\gamma}), \quad (1.17)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, с^{-1} ; ν_r – кинематическая вязкость газовой среды, $\text{м}^2/\text{с}$; v_p – скорость частицы, $\text{м}/\text{с}$; d_p – диаметр частицы, м ; v_r – скорость потока газа, $\text{м}/\text{с}$.

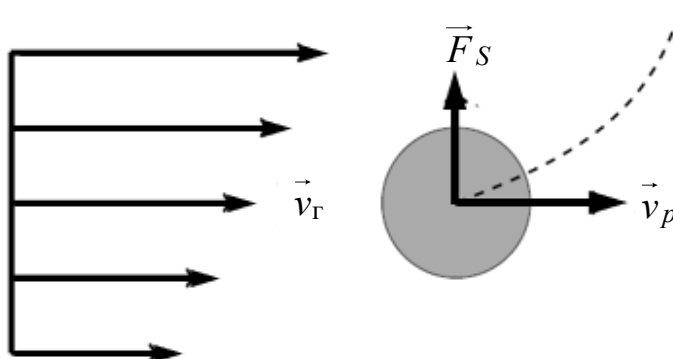


Рис. 1.15 – Схема воздействия подъемной силы Саффмана на движущуюся частицу [117]

Если скорость частицы превышает скорость движения окружающего ее потока продуктов сгорания, подъемная сила Саффмана ($\vec{F}_S < 0$) направлена к стенкам и способствует осаждению частиц в случае, если скорость частицы меньше скорости транспортирующего потока, сила Саффмана ($\vec{F}_S > 0$) обуславливает движение частицы по направлению от стенки, тем самым препятствуя осаждению частиц [17].

Для частицы, соприкасающейся с поверхностью трубок, подъемная сила Саффмана является главной при нормальном направлении движения к стенке трубки, а при тангенциальном направлении движения к стенке сила становится главной сила сопротивления среды [117].

Электрофорез. Воздействие на дисперсные частицы силами электрического поля. Значение силы определяется по формуле:

$$F_{EI} = q\vec{E}, \quad (1.18)$$

где q – заряд частицы, Кл; \vec{E} – напряженность электрического поля, В/м.

Электрическое поле, воздействует на движущиеся частицы с электрическим зарядом, изменяя их траектории движения, притягивая их либо к заряженной поверхности (металлу) трубок, либо, отталкивая, отклоняя движение частиц от трубок в зависимости от полярности заряда поверхности трубок и движущихся частиц [106].

Графическое представление механизмов осаждения твердых золовых частиц на наружную поверхность трубок показана на рис. 1.16 [120, 150].

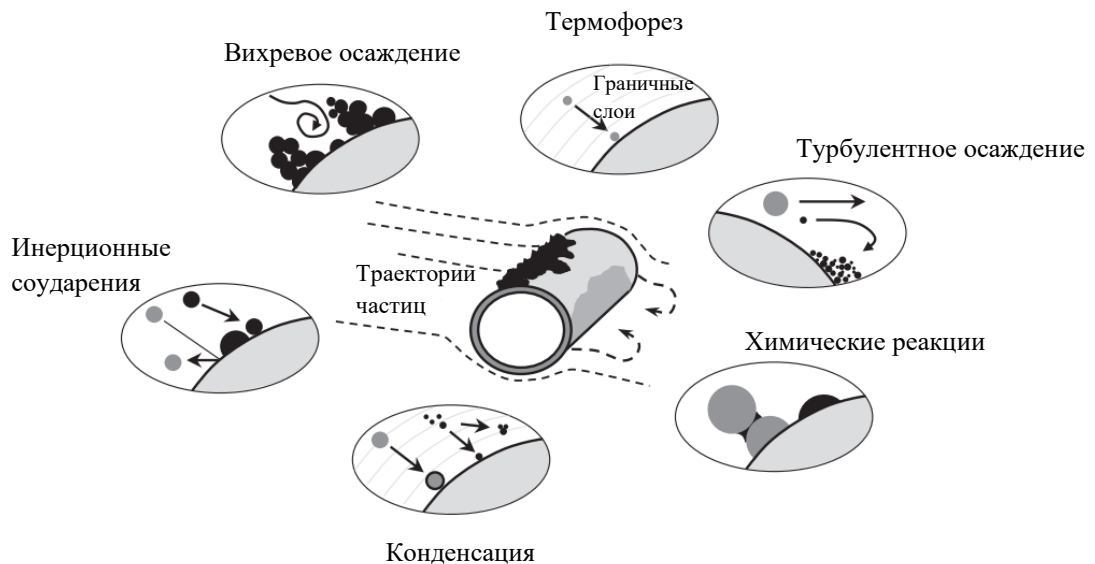


Рис. 1.16 – Механизмы осаждения золовых частиц на стенку трубы

В горизонтальном направлении на движущиеся частицы оказывают воздействие силы, равные произведению градиента давления среды на объем

твердой частицы, а также силы вязкостного трения при движении частицы в среде. В вертикальном направлении в качестве действующих сил авторами работы [51] были приняты: сила тяжести, выталкивающая сила Архимеда, сила Магнуса (эффект Магнуса), подъемная сила Саффмана, сила турбофореза и турбулентной диффузии в вертикальном направлении, а также силы вязкостного трения при движении частицы в среде.

На рис. 1.17 показана скорость выпадения твердых частиц из турбулентного потока на стенку вертикального круглого канала в зависимости от безразмерных переменных.

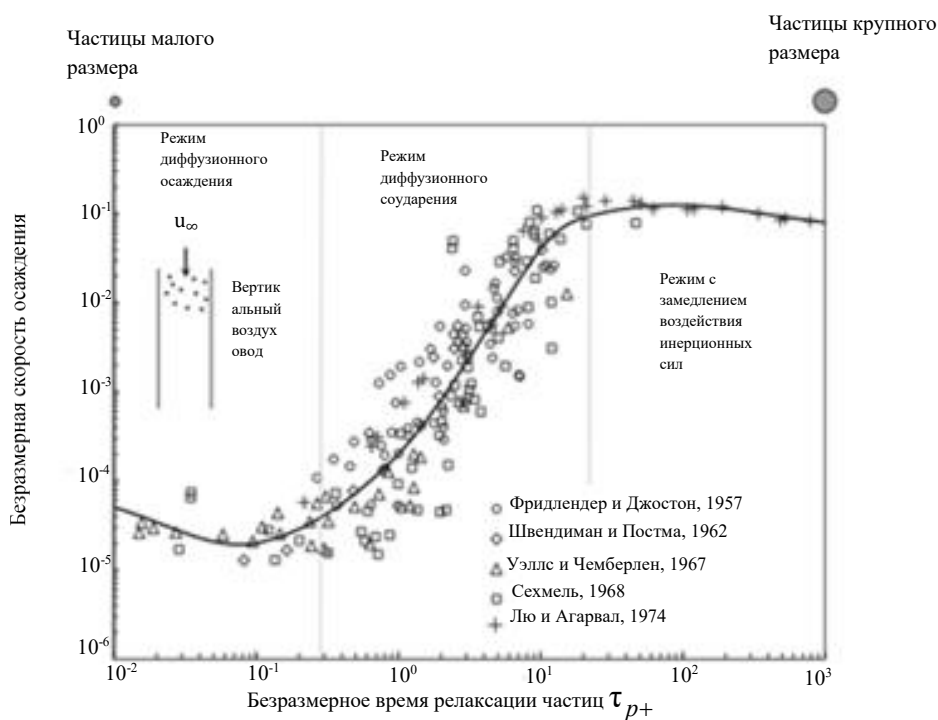


Рис. 1.17 – Скорость выпадения частиц из турбулентного потока на стенку вертикального канала

Горизонтальная ось на рис. 1.17 показывает безразмерное время релаксации частицы, которое можно рассматривать как время, требуемое твердой частице, чтобы осуществить отклик на изменения скорости газовой среды. Время релаксации – это время, необходимое частице для достижения равно-

весной скорости со скоростью транспортирующего газового потока из-за сопротивления (трения) молекул газа [120, 143]. Время релаксации частицы τ_p рассчитывается по формуле [117, 140]:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_\Gamma}, \quad (1.19)$$

где ρ_p – плотность частицы, кг/м³; μ_Γ – динамическая вязкость газовой среды, Па·с; d_p – диаметр частицы, м.

Кривая осаждения на рис. 1.17 разделена на три различных режима осаждения [117, 143]. В типичном для мелких частиц золя “режиме диффузионного осаждения” скорость осаждения V_{dep} уменьшается с увеличением τ_{p+} . Этот режим зависит от числа Шмидта для частиц [134]:

$$Sc = \frac{\nu_\Gamma}{D_p}, \quad (1.20)$$

где D_p – коэффициент броуновского движения частиц; ν_Γ – кинематическая вязкость газа, м²/с.

В случае низкого значения числа Шмидта частицы практически не подвержены влиянию вязкости, что повышает вероятность осаждения частиц, поскольку частицы будут легче пересекать ламинарный (вязкий) подслой [134]. В случае больших значений числа Шмидта значения коэффициента диффузии становятся невелики и осаждение становится более затруднительным [134].

“Режим диффузионного осаждения” зависит от турбулентной диффузии частиц из середины канала вертикального воздуховода и броуновского движения в очень тонком слое, прилегающем к стенкам теплообменных трубок или газоходов [120]. Частицы диффундируют из областей с высокой концентрацией частиц в области с более низкими значениями. Это можно интерпретировать аналогично молекулярной диффузии газа. В “режиме диффузионного осаждения” при коротком времени релаксации частиц преобладают турбулентная и броуновская диффузии непосредственно рядом со стенками трубок [143].

Промежуточный режим называется режимом “диффузионного соударения”, при котором наблюдается значительное увеличение скорости образования отложений [117, 143]. Был сделан вывод о том, что в этой режимной области преобладает взаимодействие между частицами, обладающими значительной инерцией, и турбулентными вихрями газа [117, 120]. Инерция частиц и приобретённый ими импульс в пристеночной области достаточно велики для того, чтобы они могли пересечь вязкий подслоя и осесть на стенке. Третий режим “с замедлением инерционного воздействия” не подвержен влиянию эффектов диффузии частиц [143]. Крупные частицы, имеющие достаточный импульс от больших турбулентных вихрей, сами достигают стенки [111]. Наблюдается небольшое снижение скорости образования отложений с увеличением размера частиц, что объясняется наличием частиц большего размера, которые проявляют высокую устойчивость при нахождении в турбулентных вихрях.

1.5. Выводы по разделу 1

1. Шлаковые золовые отложения (вязкий тип) и сыпучие золовые отложения, вызванные осаждением на наружную поверхность теплообменных труб летучих частиц из потока продуктов сгорания, являются главными причинами внеплановых выводов котлов из эксплуатации;

2. Инерционное соударение является доминирующим физическим принципом в образовании отложений. Вероятность соударения частицы с поверхностью труб является функцией поперечного шага труб и чисел Рейнольдса;

3. Сажистые и золовые натрубные отложения препятствуют процессам активной передачи теплоты нагреваемому теплоносителю, эффективной работе конвективных поверхностей нагрева и снижают КПД котлов.

2. ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЯМИ НАГРЕВА, ОБРАЗОВАНИЕ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

2.1. Принципы взаимодействия твердых частиц с теплообменными поверхностями труб в конвективных пакетах

В результате анализа [40] было выявлено, что процесс осаждения мелких твердых частиц на поверхности состоит из двух этапов: транспортирование потоком продуктов сгорания твердых частиц к поверхности и контактное взаимодействие частиц с поверхностью при их осаждении с потенциальной адгезией твердых частиц к этой поверхности либо к слою ранее осевших частиц.

Воздействие движущегося потока газа на образовавшийся слой осажденных на поверхности трубки частиц загрязнений может быть охарактеризовано «лобовым давлением» – давлением набегающего потока газовой среды на единицу площади поперечного сечения слоя осажденных частиц [38]. «Лобовое давление» оказывает воздействие на выступающие края наружной поверхности слоя отложений, и величина такого давления возрастает с увеличением скорости газового потока.

Золошлаковые отложения будут интенсивно откладываться на поверхности трубок до момента, пока не потеряют механическую прочность под воздействием гравитационных сил (в момент времени, когда их величина превысит адгезионную прочность сформировавшихся отложений [150]) и гидродинамических сил воздействия на них запыленного газового потока [34, 126].

Отмечается, что вследствие существования ненасыщенных силовых полей из атомов в приповерхностном слое твердых тел возникает сила притяжения, являющаяся главной движущей силой образования загрязняющих отложений на трубках конвективных пучков котлов [53]. Но взаимодействие приповерхностных силовых полей твердых тел (металла труб, твердых частиц загрязнений) возможно только при соприкосновении тел или на крайне малом

расстоянии между взаимодействующими телами из-за ограниченности действия силы притяжения в пространстве, которая имеет обратную квадратичную зависимость от расстояния между телами. Величина силовых полей твердых тел зависит от кривизны поверхности твердых тел, но масса твердых тел и их геометрические размеры не оказывают никакого влияния, в результате этого величина силы притяжения для частиц золы большого размера меньше силы инерции и силы тяжести для этих частиц и не способны к закреплению твердых частиц на поверхности стенок конвективных труб. Величина силы притяжения для частиц золы малого размера часто оказываться меньше силы их инерции и силы тяжести, в связи с чем повышается вероятность касания частицами трубок и их закрепления на теплообменной поверхности.

Обычно проводится различие между соударением частиц, прилипанием и вероятностью выпадения твердых частиц из потока газовой среды, которые определяются как [40, 111, 120, 123, 140, 150]:

$$\text{Соударение, \%} = \frac{\text{Количество столкнувшихся с поверхностью труб частиц}}{\text{Общее количество двигающихся частиц}}$$

$$\text{Прилипание, \%} = \frac{\text{Масса частиц, прилипающих к поверхности}}{\text{Масса частиц, сталкивающихся с поверхностью}}$$

На рис. 2.1 показаны несколько вариантов возможных сценариев удара частицы (расплавленной, частично расплавленной или твердой) о чистую поверхность стенки трубы [114, 120].

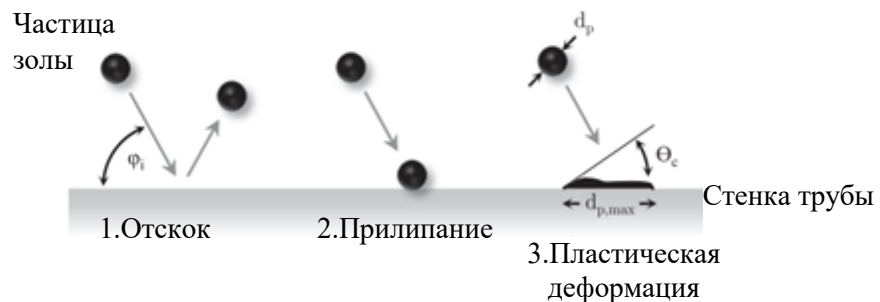


Рис. 2.1 – Возможные варианты взаимодействия частиц золы со стенками теплообменных труб конвективного пакета

На столкновение частиц золы с поверхностью влияют параметры: угол удара, скорость вращения частиц золы до удара, свойства частиц и материала стенок поверхностей нагрева, а также форма наружной поверхности частиц, шероховатость поверхности образовавшихся отложений [37, 40, 120, 123]. Динамика соприкосновения частиц со стенками труб особенно сложна для частиц несферической формы из-за вращательного движения частиц и сложности расчета площади контакта между ударяющейся частицей и поверхностью стенки трубы в момент удара.

Движущиеся частицы обладают несколькими видами энергии до момента столкновения с поверхностью трубок [117]. Кинетическая энергия $E_{p,kin}$ накапливается при разгоне тела частицы в потоке, а также происходит накопление кинетической энергии вращательного движения $E_{p,rot}$ при вращении частицы в потоке. Электростатическая энергия $E_{p,elst}$ возникает под действием электромагнитного поля, в котором движущаяся частица имеет заряд. После соприкосновения частицы с поверхностью трубки, между ними начинает накапливаться энергия сцепления (адгезии) E_{ad} . Из-за происходящего после столкновения частицы со стенкой трения между их поверхностями некоторое количество энергии может быть потеряно в виде теплоты E_l .

Если пренебречь кинетической энергией вращательного движения частиц в потоке, то для твердой частицы до и после столкновения можно записать энергетический баланс [117]:

$$E_{p,kin,1} + E_{p,elst,1} = E_{ad} + E_{p,elst,2} + E_l, \quad (2.1)$$

где $E_{p,elst,1}$ и $E_{p,elst,2}$ – электростатическая энергия до и после столкновения частиц соответственно, Дж; $E_{p,kin,1}$ – кинетическая энергия частицы до столкновения, Дж; E_{ad} – энергия адгезии, Дж/м²; E_l – потери энергии в процессе пластической деформации частицы в ходе удара, Дж.

Если кинетическая энергия частицы выше, чем энергия, поглощаемая во время столкновения, она отскочит (вариант 1 на рис. 2.1). Частица останется

на поверхности после удара о нее (вариант 2 на рис. 2.1), если ее кинетическая энергия полностью поглотится во время столкновения [150]. С увеличением кинетической энергии частицы для создания условий прилипания требуется меньшая вязкость частицы и, следовательно, более высокая температура. Удар с пластической деформацией частицы с низким значением вязкости при высоких температурах показан на рис. 2.1 (вариант 3). Частицы деформируются на поверхности и сохраняют свою деформированную форму либо из-за охлаждения и затвердевания, либо из-за низкого поверхностного натяжения.

На рис. 2.2 представлен расширенный перечень возможных механизмов осаждения частиц [120].

Твердые частицы обычно после удара отскакивают от поверхности стенок труб или поверхности образовавшихся отложений, но они также могут быть захвачены поверхностью отложений, если она достаточно липкая [123, 146]. В начале процесса осаждения, когда трубка чистая, первоначально только липкие частицы образуют отложения. Частицы, прилипшие к поверхности труб из-за низкой ее температуры, быстро затвердевают [54]. Когда все входящие частицы липкие, частицы, сталкиваясь с поверхностью отложения, образуют отложения независимо от условий поверхности отложения. Скорость образования отложений пропорциональна потоку ударяющихся о поверхность частиц. К этой категории относятся шлаковые отложения.

Когда толщина липкого слоя велика, кинетическая энергия падающей частицы может рассеиваться за счет сочетания сил пластической деформации твердой частицы при ударе и вязкого трения из-за липкого слоя сульфата натрия. Если объединенная энергия рассеивания больше, чем кинетическая энергия падающей частицы, то частица прилипнет к поверхности [123]. Ударяющаяся частица отскочит, если у нее сохранится достаточный запас кинетической энергии для преодоления силы взаимодействия с поверхностью на границе раздела поверхность-частица.

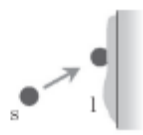
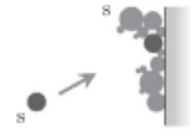






Механизм:	Графическое представление:	Описание:
Прилипание к липкой поверхности		Твердые частицы золы ударяются о расплавленный жидкий слой и закрепляется благодаря его низкой вязкости и липкости.
Захват в пористом слое		Твердая частица золы ударяется в пористый слой натрубных отложений и закрепляется его структурой
Конденсация на частице		Неорганические пары конденсируются на поверхности частицы золы при более низких температурах и образуют липкую поверхностную пленку
Химическая реакция частицы		Частицы золы могут реагировать с частицами продуктов сгорания, что может привести к образованию легкоплавких эвтектик
«Цементация» частиц	1.  2. 	Твердые частицы золы, достигающие поверхности труб сопровождаются каплями расплавленной жидкости, которые «цементируют» твердые частицы
Изменение условий внутри несгоревшей угольной частицы		Несгоревший уголь горит в восстановительных реакциях, которые снижают температуру плавления золы и повышают температуру частиц, тем самым снижая вязкость золы
Спекание частиц		Частицы спекаются друг с другом
Осаждение агломератов частиц		Агломераты рассеивают кинетическую энергию, что приводит к прилипанию частиц
Отслоение из-за термических напряжений	1.  2. 	Частица расплавленной золы ударяется о твердую стенку, деформируется, прилипает и затвердевает. Во время охлаждения разные коэффициенты теплового расширения между частицей и стенкой приводят к напряжениям и отслоению

Рис. 2.2 – Механизмы, влияющие на прилипание и отскок частиц золы

Как правило, осадиться частицам на уже существующем слое отложений гораздо сложнее, чем на чистой поверхности труб из-за неровностей, собственных поверхностям слоя отложений, конденсации сульфата натрия на поверхности отложений и спекания осажденных частиц [123, 124].

Множественные неровности на наружной поверхности стенок труб способствуют более легкому закреплению попавших на трубы частичек золы. Шероховатость омываемой поверхности может приводить к появлению турбулентных эффектов (переходу от ламинарного обтекания) в вязком подслое рядом с поверхностью трубок [106].

На практике шероховатость поверхности стенки труб можно игнорировать при столкновении крупных частиц со стенкой, поскольку базовый размер шероховатости стенки обычно намного меньше размера ударяющейся частицы [123, 124]. Для мелких частиц, диаметр которых меньше характерного размера шероховатости стенки (L_c), шероховатость стенки может значительно влиять на торможение частиц во время столкновения (рис. 2.3) [124]. Такие особо мелкие частицы могут множество раз сталкиваться под разными углами со стенкой трубки, а более крупные частицы в подавляющем количестве случаев сталкиваются только один раз с поверхностью одной трубки.

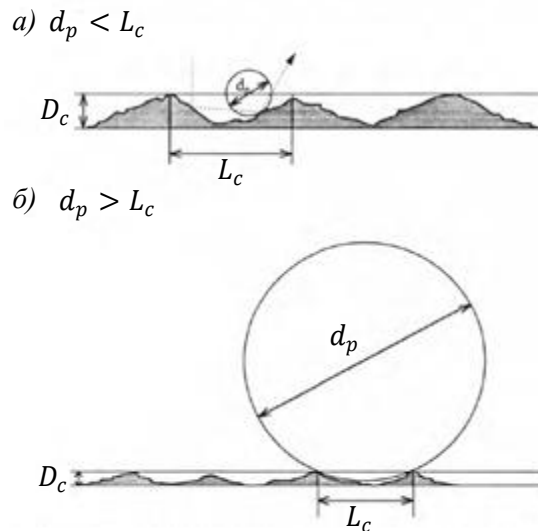


Рис. 2.3 – Схема столкновения частиц золы с шероховатой поверхностью стенок труб для случая [77]: а) – диаметр частиц меньше характерного размера шероховатости поверхности труб; б) – диаметр частиц больше характерного размера шероховатости поверхности труб

Следует отметить, что шероховатость поверхности стенок труб на закрепление загрязнений может оказывать влияние только в начальный период времени работы поверхностей нагрева, далее поверхность трубки покрывается

слоем частиц сажи и золы и на закрепление частиц будет играть роль уже шероховатость внешнего слоя отложений [37].

Силы, действующие на частицу, осевшую на поверхности, показаны на рис. 2.4 [40, 76, 120].

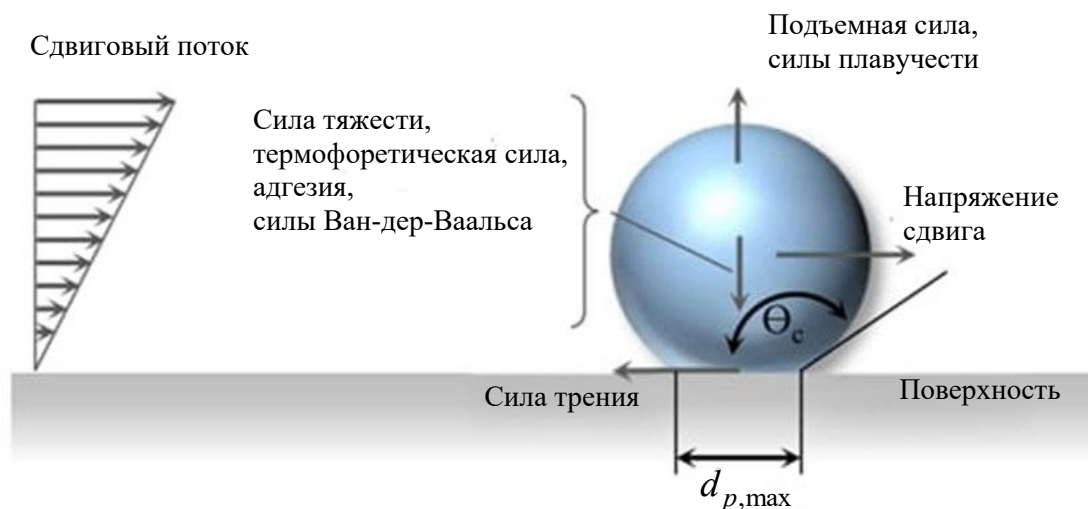


Рис. 2.4 Силы, действующие на частицу золы, закрепившуюся на поверхности

Их можно разделить на действующие параллельно и перпендикулярно к поверхности осаждения. Параллельные силы — это силы сопротивления, трения и сдвига, вызванные потоком газа в пограничном слое. Перпендикулярные силы — это подъемная сила, силы плавучести, сила тяжести, сила упругого отталкивания, термофорез и поверхностные силы, вызванные адгезией или силами Ван-дер-Ваальса. Силы Ван-дер-Ваальса известны как силы нековалентного взаимодействия между атомами или молекулами [120]. Большинство частиц несут небольшой заряд, который приводит к силе притяжения к противоположному заряду, обнаруженному на поверхностях. Диполи и результирующие силы способствуют адгезии частиц наряду с эффектами поверхностного натяжения и электростатическими силами.

Сила сцепления (сила адгезии) между частицей и поверхностью трубки может быть описана несколькими составляющими [117]: сила сцепления с дальним радиусом взаимодействия, описываемая силами Ван-дер-Ваальса и другими; силы сцепления с ближним радиусом взаимодействия, описываемые

химическими реакциями (например, водородные химические межмолекулярные связи).

2.2. Принципы формирования натрубных отложений

Процесс образования натрубных отложений, формирующихся из загрязняющих частиц на поверхностях нагрева котлоагрегатов является весьма сложным многофакторным явлением [135], которое зависит от минеральной составляющей топлива, содержания различных фракций в составе летучей золы, условий организации сжигания топлива в топке котла, физических явлений турбулентного переноса твердых частиц загрязняющих веществ в двухфазной (распределенные в объеме газа твердые частицы) среде, условий работы конвективных пакетов (характера распределения траекторий движения аэродисперсного потока дымовых газов и твердых частиц в газовом тракте конвективного пакета котла, температуры поверхностей нагрева) с учетом различных режимов работы котлового оборудования и особенностей конструкции каждого из типов котлоагрегатов [13, 22, 33, 49].

Влияние режимных параметров работы котлоагрегата и характеристик его конструкции на процесс образования отложений сажистыми и золовыми частицами заключается в характере распределения концентрации частиц вдоль омываемой поверхности конвективных труб и физико-химических свойств и структуры сажистых и золовых отложений [40]. Увеличение коэффициента избытка воздуха в горелке α_r влечет за собой уменьшение концентрации частиц летучей золы в продуктах сгорания и соответственно количества осажденных частиц [112].

Представленная на рис. 2.5 блок-схема демонстрирует зависимости образования натрубных отложений загрязняющих веществ и связи между ними [49].

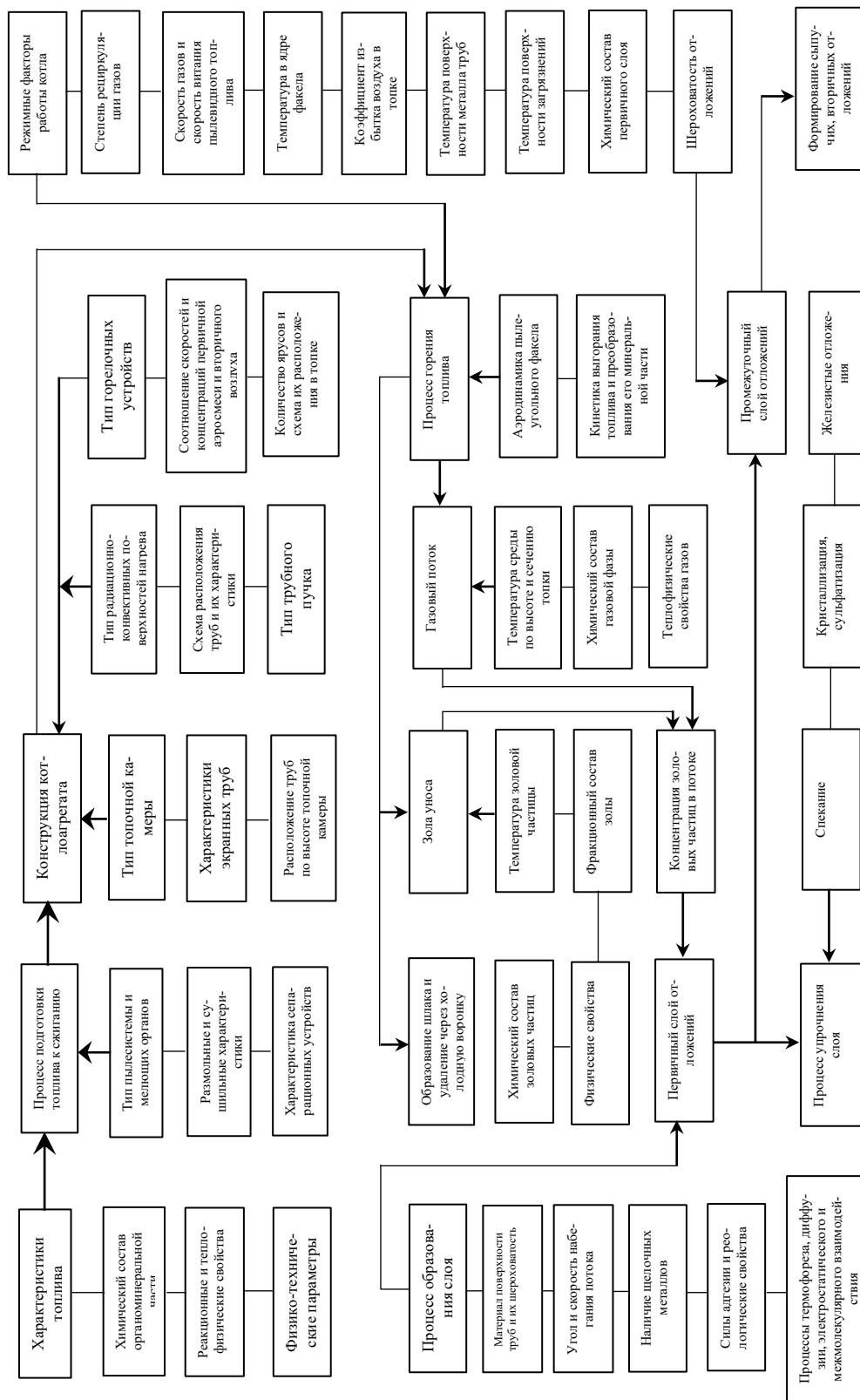


Рис. 2.5 – Схема, отражающая зависимости образования отложений на поверхностях нагрева котлов и связи между ними

Для проведения количественной оценки степени загрязнения наружной поверхности конвективных труб следует найти термическое сопротивление слоя накопившихся отложений на поверхности труб [53]. Термическое сопротивление слоя отложений из сажистых и золовых частиц в конвективных пакетах можно определить по уравнению [43, 53]:

$$R_3 = \frac{1}{k_3} = \frac{1}{\alpha_3} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \quad (2.2)$$

где R_3 – термическое сопротивление слоя отложений, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; k_3 – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к поверхности загрязненной трубы, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; α_3 – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к наружной поверхности слоя отложений, $\text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{°C})$; δ_3 – средняя толщина слоя отложений, м; λ_3 – коэффициент теплопроводности слоя отложений, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{°C})$.

Принимаемые значения коэффициента теплоотдачи α_3 от продуктов сгорания для незагрязненной трубы конвективного пакета, работающего в незапыленном потоке продуктов сгорания и коэффициента теплоотдачи α от продуктов сгорания к поверхности загрязненной трубы конвективного пакета, работающего в запыленном и сильно запыленном потоке продуктов сгорания не равны друг другу по причине того, что степень шероховатости и форма неровностей поверхности загрязненной и незагрязненной труб разные и дополнительную разницу в активность процессов теплоотдачи вносят пролетающие рядом золовые частицы [53].

Другой существующий показатель влияния загрязнений радиационной поверхности нагрева на эффективную работу котлоагрегата – коэффициент тепловой эффективности, упоминаемый в работе [49], принимаемые значения которого в конструктивных тепловых расчетах по данным нормативной документации так же в значительном количестве случаев могут отличаться от действительных значений (рис. 2.6).

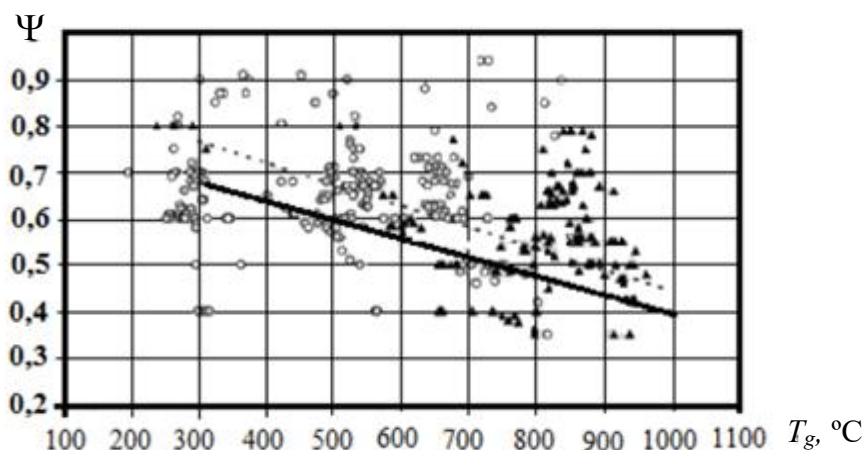


Рис. 2.6 – Зависимость коэффициента тепловой эффективности радиационных поверхностей нагрева от температуры продуктов сгорания [48]: «---» – нормативная кривая для умеренно загрязняющих и сильно загрязняющих видов топлива с проведением очистки; «—» – нормативная кривая для сильно загрязняющих видов топлива без проведения очистки; «-▲-» – поверхность после очистки; «-○-» – поверхность без очистки

В случае наличия чистой поверхности труб (без отложений), свойственной начальному периоду времени работы котла, коэффициент тепловой эффективности близок к единице, в свою очередь коэффициент загрязнения при этом близок к нулю [49].

В работах [49, 74] представлено критериальное уравнение, которое характеризует зависимости (критерии Коши, Вебера и др.), свойственные процессам появления и развития золовых и шлаковых отложений на поверхностях нагрева котлов.

Определение скорости осаждения шлаковых частиц относительно не сложная задача, так как все шлаковые частицы, сталкивающиеся с поверхностью, теряют скорость и за счет сил вязкости прилипают к ней. Однако, в то же время, представляет сложность с достаточной точностью определить форму золошлаковых отложений из-за свойств текучести среды [123].

Толщина слоя шлаковых отложений в зависимости от времени работы котла в условиях запыленного потока продуктов сгорания и интенсивности

процессов ударного взаимодействия шлакующих частиц с поверхностью конвективных труб [33] может быть найдена по зависимости:

$$\delta_3 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} q_{\text{шл}} d\tau, \quad (2.3)$$

где δ_3 – толщина слоя отложений загрязнений, м; $(\tau_2 - \tau_1)$ – диапазон времени образования обложений, с; $q_{\text{шл}}$ – интенсивность процессов шлакования поверхностей нагрева котла, кг/м²с.

Интенсивность процессов ударного взаимодействия шлакующих твердых частиц с поверхностью труб котлов может быть найдена по формуле [19, 33]:

$$q_{\text{шл}} = v_{\Gamma} C_p E' K_{\text{шл}}, \quad (2.4)$$

где v_{Γ} – скорость потока продуктов сгорания в зоне осаждения, м/с; C_p – концентрация золовых частиц в потоке продуктов сгорания, г/м³; E' – коэффициент, учитывающий вероятность столкновения твердых частиц с поверхностью труб; $K_{\text{шл}}$ – коэффициент шлакования, определяемый как отношение числа осевших на поверхности труб твердых частиц к общему числу твердых частиц, проконтактировавших с поверхностью труб.

Скорость потока продуктов сгорания в зоне осаждения и соответственно, скорость самих твердых золошлаковых частиц в пристеночном слое [33, 80] вычисляется по зависимости:

$$v_{\Gamma} = \frac{3Rv_{\Gamma}\lambda_{\Gamma}(T_{\Gamma} - T_3)}{2pM(2\lambda_{\Gamma} + \lambda_3)\delta_{\phi}}, \quad (2.5)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $R = 8,314$ Дж/(моль·К); p – абсолютное давление продуктов сгорания, Па; M – молекулярный вес продуктов сгорания, а.е.м.; $\delta_{\phi} = 0,8r / \sqrt{\text{Re}}$ – толщина пристеночного слоя газа на наружной поверхности конвективных труб, измеренная под прямым углом к направлению движения потока; r – радиус наружной поверхности конвективных

труб, м; ν_r – кинематическая вязкость продуктов сгорания, м²/с; T_3 – температура на поверхности натрубных золошлаковых отложений, К; λ_r – коэффициент теплопроводности потока продуктов сгорания, Вт/(м·°С); λ_3 – коэффициент теплопроводности натрубных золошлаковых отложений, Вт/(м·°С); T_r – температура потока продуктов сгорания, К.

Однако, зависимость (2.5) обладает существенной погрешностью в связи с тем, что коэффициент теплопроводности натрубных золошлаковых отложений не учитывает их структуру, включающую в свой состав слои с разным химическим составом и плотностью [33].

Коэффициент, учитывающий вероятность столкновения твердых частиц с поверхностью конвективных труб [19, 33] вычисляется по формуле:

$$E' = \int_0^1 6,9 E_\delta n \Delta^{n-1} e^{-6,9 \Delta^n} d\Delta, \quad (2.6)$$

где E_δ – коэффициент вероятности столкновения частиц с поверхностью труб; n – показатель степени однородности размеров частиц золы в потоке продуктов сгорания; $\Delta = \delta / \delta_{\max}$ – относительный размер золошлаковых частиц, вычисляемый при помощи уравнения Розина-Раммлера.

Коэффициент шлакования [12, 33] вычисляется по формуле:

$$K_{\text{шл}} = \frac{1}{1 + \frac{(q_{\text{л}} + q_{\text{к}}) \nu_p C_p E' \tau^2}{\lambda_3 \rho_p^2} K}, \quad (2.7)$$

где $q_{\text{л}}$ – тепловой поток, переданный поверхности нагрева излучением, Вт; $q_{\text{к}}$ – тепловой поток, переданный поверхности нагрева конвекцией, Вт; ρ_p – плотность золошлакового отложения, кг/м³; K – коэффициент, учитывающий энергетический баланс процессов при контактном взаимодействии золошлаковых частиц, находящихся в твердом, размягченном и расплавленном виде с металлом конвективных труб [33].

2.2.1. Зависимости формирования отложений от времени эксплуатации котлоагрегата

Образование и развитие фаз роста отложений частицами сажи и золы в зависимости от времени работы котла происходит в несколько этапов (рис. 2.7): транспортирование частиц к поверхности труб, адгезионное сцепление частичек золы с металлом, формирование первичного слоя отложений, формирование вторичного слоя отложений, установление равновесного состояния между накоплением и разрушением слоя отложений [34, 37, 47, 106, 135, 146].

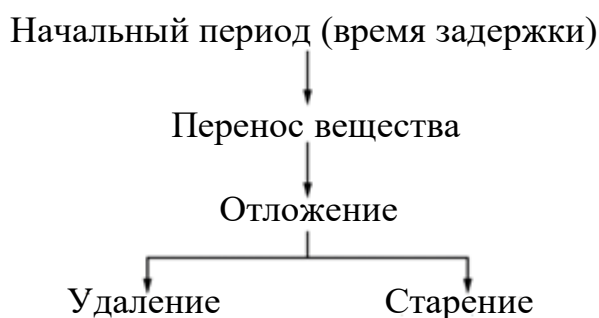


Рис. 2.7 – Этапы образования загрязнений на поверхностях нагрева [33, 36, 104, 144]

Время начального этапа (пуск котлоагрегата с чистыми поверхностями нагрева в эксплуатацию, в течении которого тепловая эффективность работы поверхности нагрева близка к максимальной) не постоянно, и зависит от воздействия ряда физических и химических факторов, например, от состава топлива [37, 103, 146].

В период второго этапа формирования происходит транспортирование золовых и сажистых частиц к местам образования отложений [106, 135]. Далее, начинает протекать процесс взаимодействия частиц летучей золы и сажи с поверхностью конвективных труб, в результате которого частицы либо закрепляются, образовав отложение, либо покидают пределы котлоагрегата не закрепившись на поверхности. После того, как слой будет сформирован, начинается его преобразования, в ходе которых будут одновременно протекать процессы как накопления частиц в слое, так и их удаление из слоя. Например,

от сдвиговых напряжений при воздействии потока газов на сформировавшийся слой отложений механизма эрозии и других факторов [37, 106, 146].

Стоит отметить этап «старения» слоя сформировавшихся отложений, в ходе которого внутри него с течением времени протекают различные физико-химические процессы, приводящие к его упрочнению, изменению состава, а также физической структуры [135].

Анализируя зависимости коэффициентов загрязнения от времени работы котлоагрегата и концентрации золовых частиц в запыленном потоке продуктов сгорания, движущихся с постоянной скоростью (рис. 2.8), видно, что в первые два-три часа работы котлов с содержанием частиц летучей золы в потоке продуктов сгорания коэффициенты загрязнения быстро увеличиваются, затем темп их роста уменьшается и после 8 часов работы стремятся к нулю [53, 136, 154].

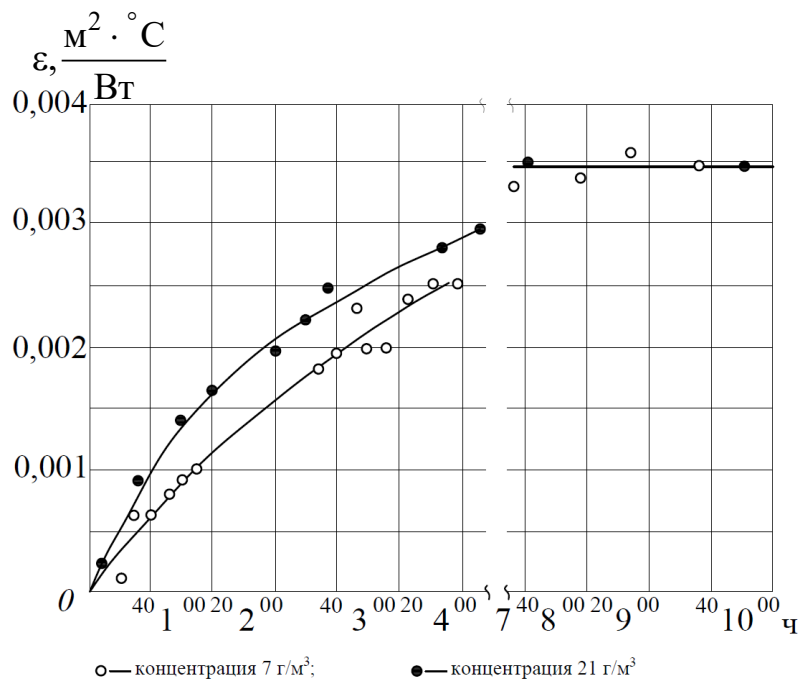


Рис. 2.8 – Зависимости коэффициентов загрязнения от времени работы котла и концентрации твердых частиц в потоке продуктов сгорания [52]

Согласно общепринятым правилам, выделяют два этапа образования отложений: первичные отложения и вторичные отложения. Первичные отложе-

ния проявляются в температурном диапазоне от температуры наружной поверхности трубок с отсутствующими на ней отложениями до температуры потока дымовых газов [34]. Температура металла стенок конвективных труб в незагрязненном состоянии и в загрязненном состоянии сильно не отличаются из-за высоких коэффициентов теплоотдачи к нагреваемому теплоносителю [53]. На образование первичных отложений влияют два процесса, также зависящих от температуры: процесса образования слоев рыхлых отложений и процессов последующего их упрочнения в слое.

При движении золовых частиц в потоке дымовых газов в расплавленном либо в пиропластическом состоянии происходит их закрепление на поверхности слоя первичных отложений за счет сил адгезии, а, далее, на закрепившиеся частицы налипают следующие частицы, образуя слой вторичных отложений. Вследствие того, что расплавленные и размягченные частицы имеют высокую адгезионную способность прикрепляться к слоям уже образованных отложений, то скорость образования вторичных отложений увеличивает нарастание связанно-шлаковых отложений. Аналогично первичным отложениям в слое вторичных отложений наблюдаются стадии упрочнения слоя путем протекания в них различных физико-химических процессов [34].

В работах [37, 106] представлены графические зависимости термического сопротивления слоя отложений от времени работы котлов в условиях запыленного потока продуктов сгорания (рис. 2.9).

Линейная зависимость (рис. 2.9) характеризует постоянный темп роста слоя отложений за время работы котла, при котором разрушения слоя или его «старения» не происходит [106]. Кривая убывающей скорости роста термического сопротивления слоя отложений характеризуется действием на слой отложений разрушающих процессов [37].

Асимптотическая зависимость (рис.2.9) показывает, что спустя время наступает материальный баланс между закрепляющимися и удаляющимися

частицами, а термическое сопротивление слоя отложений устремляется к постоянному значению [106, 136]. Скачкообразная зависимость характеризует формирование слоя сильно сыпучих отложений, когда при достижении толщины слоя отложений с их весом, превышающим силы сцепления между частицами, происходит обрушение сформировавшихся слоев отложений, а затем снова их нарастание [37, 106].

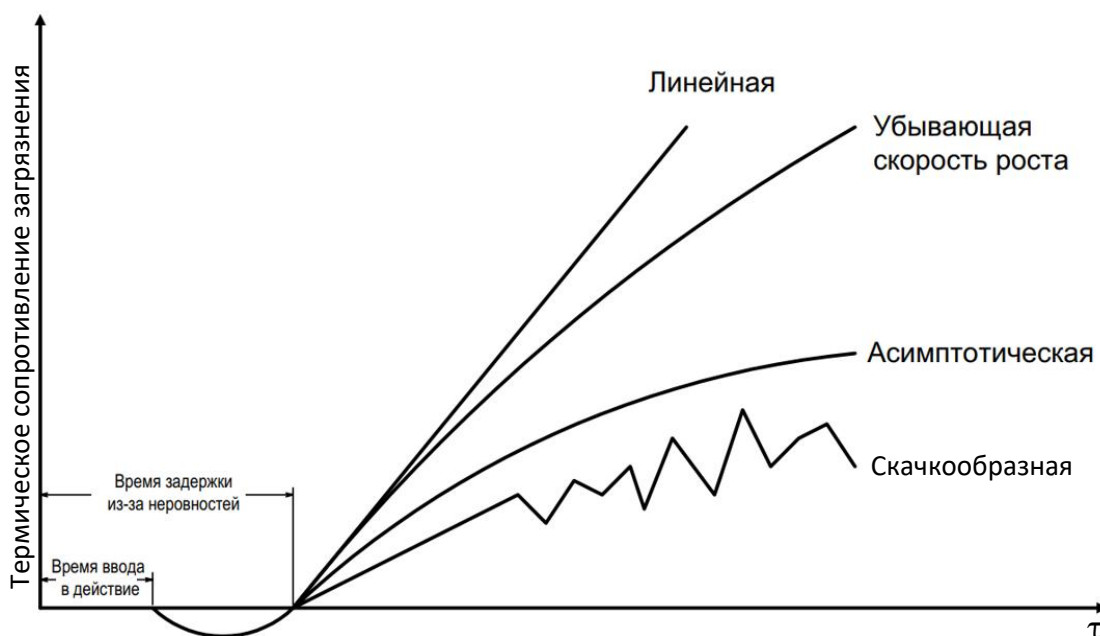


Рис. 2.9 – Кривые термического сопротивления слоя загрязнений [37, 106]

Толщина отложений ограничена силой сцепления между частицами, способной сопротивляться внешнему воздействию. Это приводит к росту слоя отложений только до величины установления динамического равновесия между оседающими на слой и выбиваемыми из слоя частицами в результате ударного воздействия на поверхность слоя других частиц [53, 136].

Стоит отметить, что при проведении периодических регламентных мероприятий по очистке наружных поверхностей труб преимущественно удаляются рыхлые первичные отложения. Это приводит к увеличению в оставшихся отложениях содержания активных частиц, способствующих росту более плот-

ного слоя первичных отложений [34, 53, 122], который в зоне непосредственного контакта с поверхностью труб особо сильно связан с оксидной пленкой металла.

При дальнейшем нарастании слоя отложений их граница постепенно смещается к границе области вихрей и становится в большей степени подвержена влиянию динамического воздействия твердых частиц большого размера, вследствие чего активность роста отложений на тыльной стороне трубок снижается и полностью прекращается после 10 часов работы оборудования.

2.2.2. Зависимости формирования отложений от скорости продуктов сгорания

Следует разделять скорость газового потока, омывающего трубки с отложениями на две скорости: скорость потока, при достижении которой происходит преодоление сил аутогезии частиц и скорость, при которой происходит преодоление сил адгезии частиц [38].

С уменьшением скорости потока продуктов сгорания уменьшается склонность твердых частиц к отскакиванию от поверхности осаждения, тем самым улучшаются условия осаждения [40, 122, 125].

При достижении продуктами сгорания скорости $w_{кр1}$, последствия ударов твердых частиц по отложениям золы приводят к тому, что в составе отложений остаются только активные связывающие частицы. Далее, слой отложений будет увеличиваться уже как сульфатносвязанный тип отложений, плотно связанный с поверхностью металла [34, 56]. Дальнейшее увеличение скорости потока будет приводить к постепенному разрушению сульфатносвязанных золовых загрязнений. При достижении скорости $w_{кр2}$ поток станет активно разрушать связи между частицами золы и поверхностью труб. При скорости потока, значительно превышающей $w_{кр2}$ будет происходить только поверхностный абразивный износ металла конвективных труб без образования слоя отложений.

Разрушение образовавшихся натрубных отложений идет путем выбивания преимущественно нейтральных твердых золовых частиц, в результате содержание в слоях отложений связывающих частиц увеличивается. В зависимости от концентрации связывающих частиц на этапе образования первичных отложений процесс приведет к образованию либо рыхлого, либо плотного слоя отложений. Твердые частицы, двигающиеся с малыми скоростями, практически не оказывают разрушающего воздействия на слой отложений, поэтому при небольших скоростях потока наблюдается активное загрязнение поверхностей нагрева, в основном нейтральными частицами золы [34]. При небольших скоростях потока натрубные отложения золы представляют преимущественно рыхлый сыпучий тип отложений, а при отсутствии в дымовых газах активных частиц золы, влияющих на упрочнение слоя, отложения могут оставаться в рыхлом сыпучем виде на весь период эксплуатации котлоагрегата.

Число контактов твердых частиц мелкой фракции, обладающих способностью соединения с металлом труб путем адгезии, увеличивается пропорционально величине скорости потока газов, а число контактов с поверхностью труб крупных частиц увеличивается пропорционально кубу скорости потока продуктов сгорания (рис. 2.10) [53]. Более высокая скорость дымовых газов увеличивает кинетическую энергию частиц и турбулентные пульсации потока, вероятность удара о стенки труб увеличивается, однако, если скорость частиц больше критической скорости удара для осаждения частиц повысится вероятность отскока частиц от стенок [120, 125, 150]. В стесненных трубных пучках наблюдаются сложные течения газовых потоков, которые могут создавать застойные области с малой турбулентностью, где частицы летучей золы имеют высокую вероятность оседания на поверхность трубок.

На рис. 2.10 приведена зависимость массы образованных золовых отложений от скорости потока продуктов сгорания [34, 99]. Масса частиц летучей

золы, забрасываемая потоком продуктов сгорания на поверхность конвективных труб, в зависимости от скорости потока продуктов сгорания и концентрацией золовых частиц имеет линейный характер [56].

Частицы летучей золы большого размера, транспортируемые высокоскоростным потоком при попадании в слой отложений, могут выбивать из него частицы осевшей золы, однако в некотором диапазоне скоростей это явление может быть не столь значимым, чтобы оказать влияние на снижение активности роста отложений. Стоит отметить, что в случае, если температура продуктов сгорания выше температуры начала шлакования поверхностей нагрева, то увеличение скорости потока не окажет влияния на снижение активности роста золовых отложений.

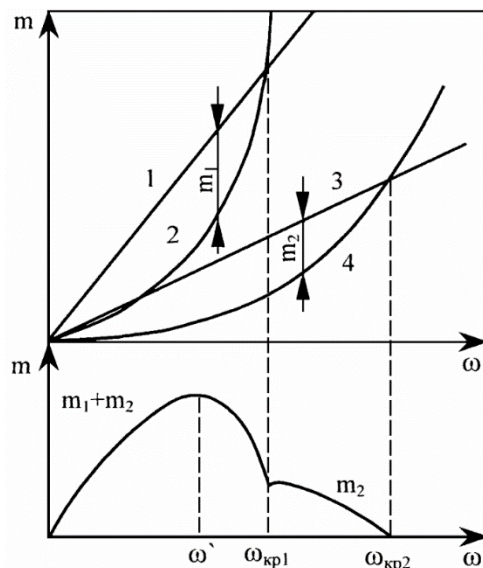


Рис. 2.10 – Зависимость массы натрубных золовых отложений от скорости потока продуктов сгорания: 1) масса осаждающихся нейтральных частиц; 2) масса выносимых нейтральных частиц ударами частиц большого размера; 3) масса осаждающихся связывающих частиц; 4) масса выносимых активных связывающих частиц ударами частиц большого размера; $m_1 + m_2$ – суммарная масса нейтральных и активных связывающих золовых частиц [34, 99]

Число контактов твердых частиц мелкой фракции, обладающих способностью соединения с металлом путем адгезии, увеличивается пропорционально скорости потока, а число контактов с поверхностью труб частиц большого размера увеличивается пропорционально кубу скорости потока (рис. 2.11) [53].

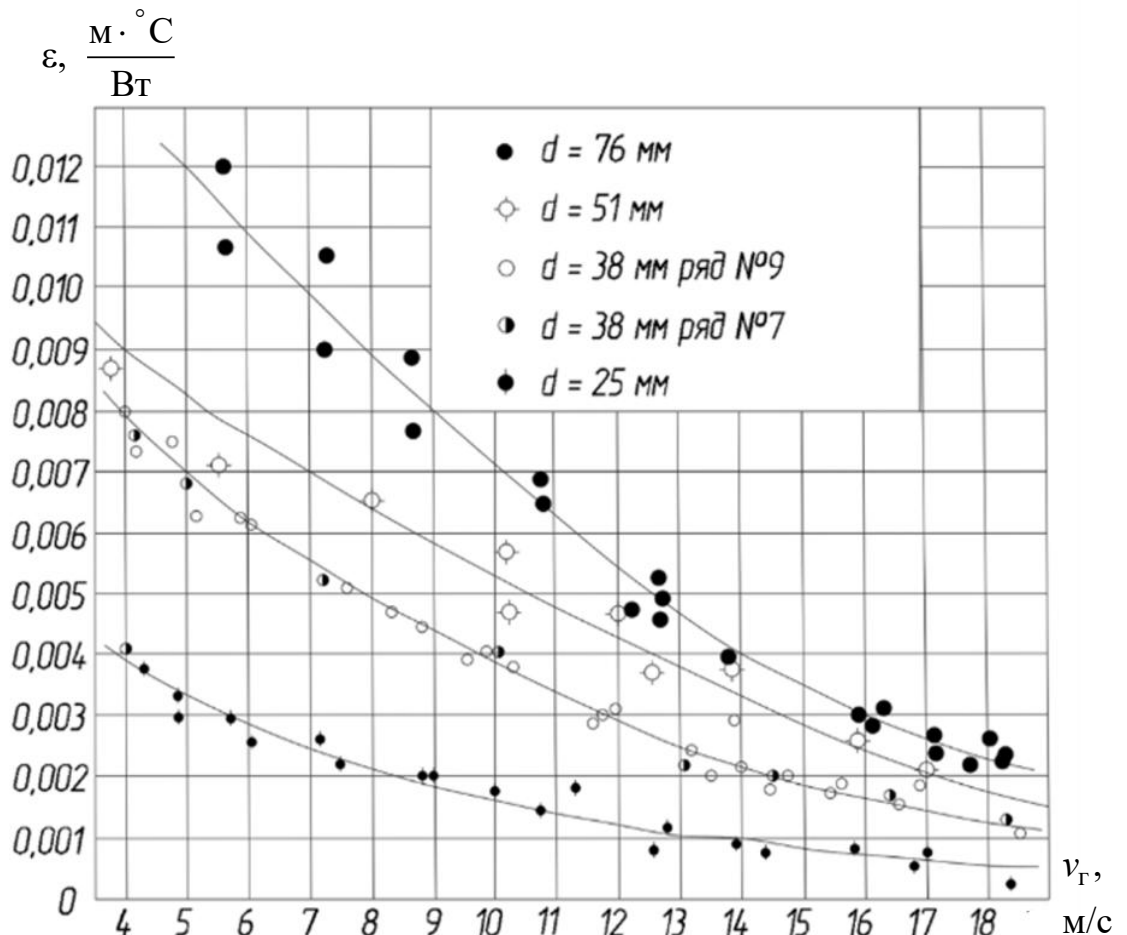


Рис. 2.11 – Зависимость коэффициентов загрязнения от скорости потока продуктов сгорания и диаметра конвективных труб при шахматной схеме размещения труб при $s_1/d_n = s_2/d_n = 2$ и $R_{30} = 33,7 \%$ [52]

Путем проведения натурных исследований было установлено, что в конвективных пучках с шахматной схемой расположения труб при скорости потока продуктов сгорания менее 3 м/с часть межтрубного пространства полностью зарастает золовыми отложениями, которые можно удалить только при помощи ручных либо механических методов очистки [53]. Для конвективных

поверхностей с коридорной схемой расположения труб при работе оборудования с малыми скоростями потока свойственно зарастание пространства между трубами в продольных рядах конвективного пучка, но при переходе на режим работы оборудования со скоростями потока более 9 м/с наблюдается эффект самоочистки.

По полученным опытным данным построены зависимости (рис. 2.12), по которым можно выявить минимальную скорость дымовых газов, снижающую вероятность полного зарастания сажистыми и золовыми отложениями проходных каналов пучка вследствие создания условий неравномерности распределения скоростей дымовых газов в проходном сечении каналов со снижением скорости ниже минимально допустимой [53].

Так же на рис. 2.12 видно, что для конвективных труб с наружным диаметром 38 мм (в сравнении с трубами наружным диаметром 25 мм), коэффициент загрязнения принимает значительно более высокие значения даже при

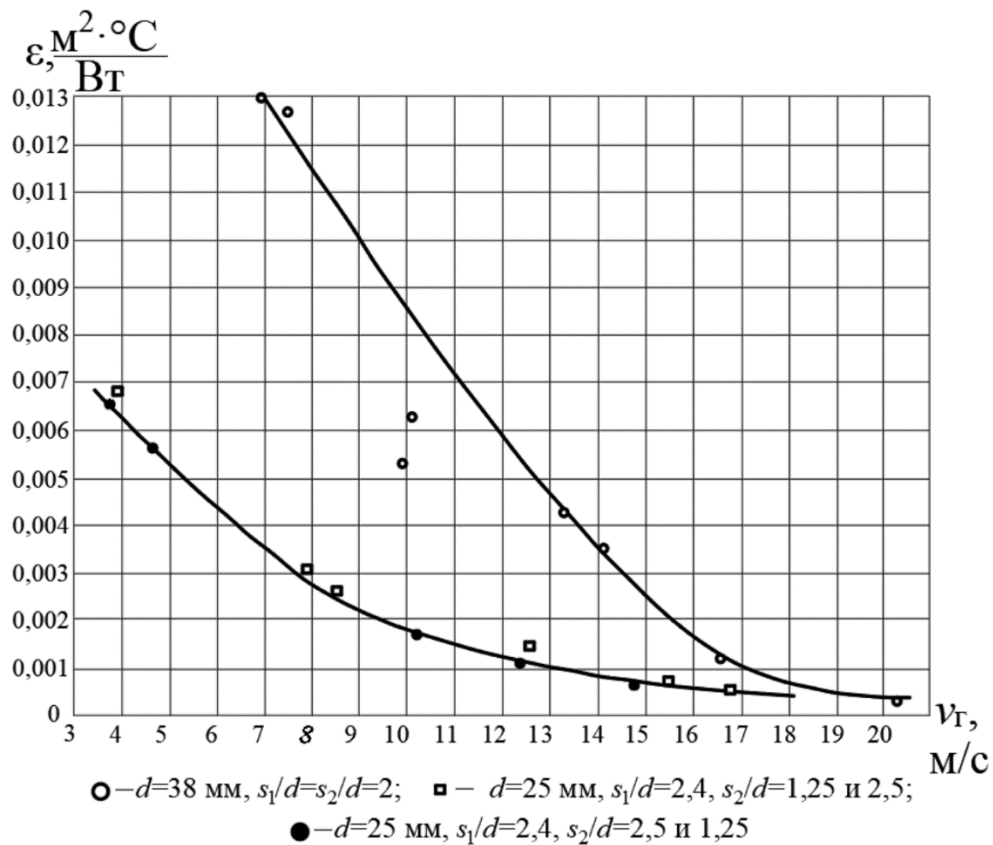


Рис. 2.12 – Зависимость коэффициентов загрязнения от скорости дымовых газов и диаметра конвективных труб при коридорной схеме размещения труб [53]

высоких скоростях потока дымовых газов. В случае возникновения значительной неравномерности поля скоростей дымовых газов из-за особенностей конструкции газового тракта рекомендуется вывести работу котлоагрегата на еще более высокие скорости дымовых газов, что приведет к повышенному их расходу и нагрузке на дымосос.

Повышенные скорости движения продуктов сгорания в газовом тракте котла могут приводить к нежелательным явлениям. Вследствие множественного динамического воздействия частиц летучей золы и несгоревшего углерода как абразивного материала на металл стенок труб при эксплуатации котлоагрегата приведет к последующему их утонению из-за постепенного стачивания металла труб [21, 122].

Для нахождения скорости частиц загрязнений, при которой возможен отрыв закрепившихся на трубах частиц загрязнений путем динамического воздействия летящих частиц на слой отложений авторами работы [38] получена зависимость:

$$m_p v_p^{0,2} (v_p - v_{p,отск}) = 6,11 \cdot 10^{-4} (F_D \sin \beta + u_* F_{AD} \cos \beta) \eta_{мех}, \quad (2.8)$$

где $\eta_{мех}$ – коэффициент, учитывающий потери механической энергии системы из соприкасающихся в момент удара тел при деформации в области касания; β – угол атаки частицами поверхности отложений; u_* – коэффициент трения, F_D – сила воздействия частицы на слой отложений; F_{AD} – адгезионная сила; v_p – скорость частицы до удара, м/с; $v_{p,отск}$ – скорость частицы при отскоке от трубки, м/с.

Математическое описание зависимости коэффициента загрязнения от скорости запыленного потока в работе [53] представлено уравнением:

$$\varepsilon = c_d c_{фр} 10^{-xv_r} \quad (2.9)$$

где ε – коэффициент загрязнения, $\text{м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$; c_d – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние наружного диаметра конвективных труб; $c_{фр}$ – эмпи-

рический коэффициент, учитывающий влияние фракций летучей золы; x – показатель зависимости шага конвективных труб в пучке; v_r – скорость продуктов сгорания, м/с.

2.2.3. Зависимости формирования отложений от диаметра труб конвективных пакетов

Таким образом было установлено, что при изменении диаметра конвективных труб форма слоя отложений не изменяется, а его толщина существенно уменьшается. Так же наблюдается неравномерность слоя отложений, ярко выраженная по площади теплопередающей поверхности конвективных труб [53].

Исследования показали, что при уменьшении наружного диаметра труб коэффициент загрязнения стремится к уменьшению. Например, уменьшение диаметра труб с 76 до 25 мм (в 3,04 раза) при шахматной схеме их размещения в пучке коэффициент загрязнения снижается в 4 раза, в тоже время уменьшение диаметра трубок с 38 до 25 мм (в 1,52 раза) коэффициент загрязнения снижается в 2,2 раза. Таким образом изменение диаметра труб пропорционально изменению коэффициента загрязнения. Для конвективных пакетов с коридорной схемой размещения труб прослеживается аналогичная зависимость коэффициента загрязнения от диаметра труб, причем темп изменения коэффициента будет выше. При уменьшении диаметра труб с 38 до 25 мм (в 1,52 раза) коэффициент загрязнения снижается в 2,5 раза.

Коэффициент, учитывающий влияние наружного диаметра конвективных труб, может быть найден [53] по следующим зависимостям:

– для труб конвективного пакета с шахматной схемой размещения труб

$$c_d = 1 + 3 \lg \frac{d_H}{d_0}, \quad (2.10)$$

– для труб конвективного пакета с коридорной схемой размещения труб

$$c_d = 1 + 3,3 \lg \frac{d_H}{d_0}, \quad (2.11)$$

где d_n – наружный диаметр конвективных труб, мм; d_0 – наружный диаметр конвективных труб эталонного пучка труб, мм. Эталонным пучком труб является пучок с трубками 38 мм. Для эталонного пучка труб коэффициент $c_d = 1$.

2.2.4. Зависимости формирования отложений от схемы размещения труб в конвективных пакетах

Относительный продольный шаг конвективных труб σ_2 при шахматной схеме в пакете оказывает существенное влияние на коэффициент загрязнения. Например, выявлено снижение коэффициента загрязнения в 4,5 раза при уменьшении σ_2 с 2 до 1 при относительном поперечном шаге труб $\sigma_1 = 2$ и скоростях продуктов сгорания 8–10 м/с. Такое явление объясняется поджатием диагонально-направленных струй потока дымовых газов к тыльной поверхности труб, что приводит к срыву осадившейся золы.

По мере уменьшения относительного поперечного шага расположения труб в пучке σ_1 вероятность возникновения удара частиц о поверхность труб увеличивается [123].

Для конвективных пучков с коридорной схемой компоновки труб изменение относительного продольного шага труб σ_2 не оказывает существенного влияния на коэффициент загрязнения так как расстояние между рядами существенно не изменяет схему омывания труб потоком дымовых газов [53]. В продольных рядах наблюдаются застойные зоны, приводящие к созданию благоприятных условий для формирования отложений на тыльной и лицевой сторонах труб. В конвективных пучках с шахматной схемой размещения труб площадь застойных зон минимальна, так как зона за тыльной стороной труб омывается диагонально ориентированным потоком, поступающим из пространства между соседними трубами диагонально расположенных труб.

Применение шахматной или коридорной схем размещения труб существенно влияет на активность процессов отложения. При движении потока в

пучках, состоящих из большого количества рядов устанавливаются турбулентные колебания потока, формирующие нестабильные вихри в межтрубном пространстве, оказывающие значительное влияние на траектории движения частиц небольшого размера [132].

Процесс загрязнения пучков тесно связан с характером движения потока продуктов сгорания внутри котельного агрегата. Когда поток продуктов сгорания застаивается в карманах газохода или меняет направление, частицы золы, увлекаемые потоком, могут активно осаждаться на стенках труб из-за сил инерционного осаждения [75]. Запыленный поток дымовых газов при встрече с компактно расположенными пучками труб раздробляется на отдельные потоки с повышенной концентрацией золовых частиц в зонах турбулентных вихрей и прямоочных зонах движения потока вблизи стенок конвективного газохода, и не высокой концентрацией в центре [56].

В случае появления отложений на лицевой стороне трубы крупные частицы золы, атаковывающие поверхность под углом в $30\text{--}45^\circ$ могут выбивать более мелкие закрепившиеся частицы загрязнений [53].

По форме поверхности образовавшихся золовых отложений можно сделать вывод, что направление движения потока продуктов сгорания (нисходящий или восходящий поток) не оказывает влияния на форму слоя отложений в коридорных пучках. В случае применения шахматной схемы размещения трубок и омывании ее слаботурбулентным потоком в направлении «снизу-вверх» коэффициент загрязнения увеличивается не более чем на 10 %.

2.2.5. Зависимости формирования отложений от тепловых режимов работы котлоагрегата

Рост температуры продуктов сгорания снижает значение модуля Юнга (E , Па) как у летящих частиц в газовом потоке, так и у частиц осевших на поверхности отложений, что приводит к увеличению активности прилипания частиц к поверхности слоя и росту скорости образования отложений [154].

Стадийность процесса образования отложений при изменении температуры дымовых газов и теплообменной поверхности, можно представить в виде схемы (рис. 2.13) [3, 34, 68]. Температура начала развития вторичных отложений является температурой начала шлакования поверхностей нагрева $T_{\text{шл}}$, определяемая в зависимости от марки угля и характеристик топочного устройства (точка пересечения (рис. 2.13, а) оси абсцисс с зависимостью удельной

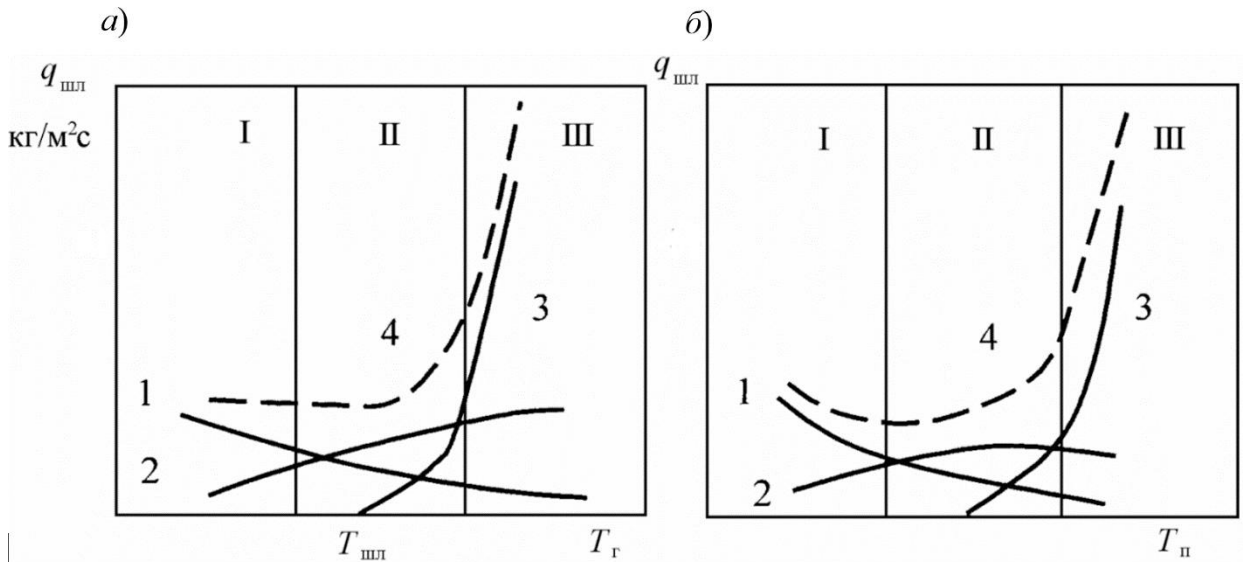


Рис. 2.13 – Зависимости удельной массовой скорости образования отложений (интенсивности шлакования $q_{\text{шл}}$) от температуры продуктов сгорания (а) и температуры наружной поверхности конвективных труб (б) с разбивкой по стадиям образования отложений:

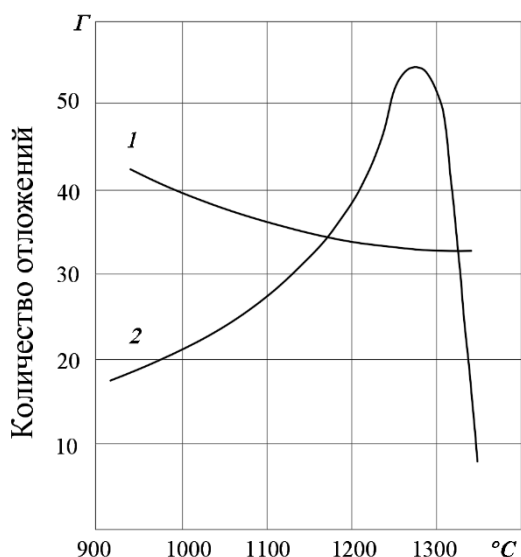
I – рыхлый вид первичных отложений; *II* – прочный вид первичных отложений; *III* – вторичные отложения; *1* – скорость увеличения толщины рыхлых первичных отложений; *2* – скорость увеличения толщины прочных первичных отложений; *3* – скорость увеличения толщины вторичных отложений; *4* – суммарная скорость увеличения толщины отложений [3, 34, 68, 116]

массовой скорости образования отложений от температуры продуктов сгорания) [32, 49, 68]. При более высоких температурах потока частицы золы размягчаются и активность их прилипания при столкновении с поверхностью увеличивается [120, 150].

Охлаждение продуктов сгорания при прохождении рядов труб приводит к снижению динамической вязкости частиц и, следовательно, к увеличению

времени их релаксации. Частицы большего размера начинают терять способность следовать за потоком газа по межтрубному пространству и начинают активно откладываться [120]. При утолщении слоя первичных отложений температура поверхности слоя первичных отложений приближается к температуре основного потока [34].

Экспериментом установлена зависимость количества сформировавшихся отложений связанного и сыпучего типов от температуры продуктов сгорания в топке [68, 74]. Зависимость рис. 2.14 показывает, что при увеличении



температуры горения количество сыпучих золовых отложений уменьшается незначительно, а количество связанных отложений стремительно возрастает.

Рис. 2.14 – Зависимость количества сформировавшихся отложений золовых частиц от температуры продуктов сгорания в топке для:
 1 – золовых отложений сыпучего типа;
 2 – золовых отложений связанного типа [68, 74]

При этом максимальное количество отложений связанного типа наблюдается при 1270 °C, а, далее, отмечается резкий спад их образования при дальнейшем увеличении температуры.

2.2.6. Зависимости формирования отложений от размера фракций и концентраций золы в потоке продуктов сгорания

Очевидно, что не все летящие в потоке частицы могут коснуться поверхности труб так как частицы малых размеров легко транспортируются турбулентным потоком. Содержание золовых частиц в движущемся потоке оказывает влияние на скорость роста слоя отложений в первые 6–7 ч работы кот-

лоагрегата. Исследования [53] показали, что при сжигании малозольных и высокозольных сортов топлива толщина слоя при длительной эксплуатации котлов примерно равна, а разница между ними проявляется при активности образования отложений лишь в первые часы работы оборудования.

Экспериментально установлено, что на трубах конвективных пакетов осаждаются преимущественно фракции частиц летучей золы малых размеров. Например, при осмотре проработавшей в условиях запыленного потока экспериментальной установки [53] было выявлено, что фракции частиц с размером до 10 мкм на поверхности труб составили 52 % от всех осевших частиц. Установлено, что частицы загрязняющих веществ более крупного размера в приграничных зонах значительно реже выпадают из потока продуктов сгорания и тем самым меньше склонны к осаждению на трубках [40].

В целях упрощения представления характера влияния различных фракций золы на активность процессов образования отложений предлагается установить условную границу, равную размеру частиц в 30 мкм [53]. Таким образом предлагается считать, что твердые частицы больше 30 мкм преимущественно участвуют в разрушении поверхности слоя образовавшихся отложений, а частицы менее 30 мкм преимущественно только осаждаются на поверхности труб. При увеличении содержания в составе летучей золы доли частиц с размером менее 30 мкм наблюдается увеличение коэффициента загрязнения (рис. 2.15–2.16).

При помощи численного моделирования в *ANSYS Fluent* проанализировано поведение потоков дымовых газов с содержанием частиц разного размера [123]. Оказалось, что частицы с малым значением числа Стокса (свойственно частицам малого размера) редко сталкиваются с трубами, тогда как большинство крупных частиц, обладающих более высокой инерцией, чаще сталкиваются с трубами [113, 150]. В то же время, энергия упругой деформации, запасаемая частицами при динамическом воздействии о поверхность осаждения, может превышать энергию адгезии, что приведет к отскоку частиц от поверх-

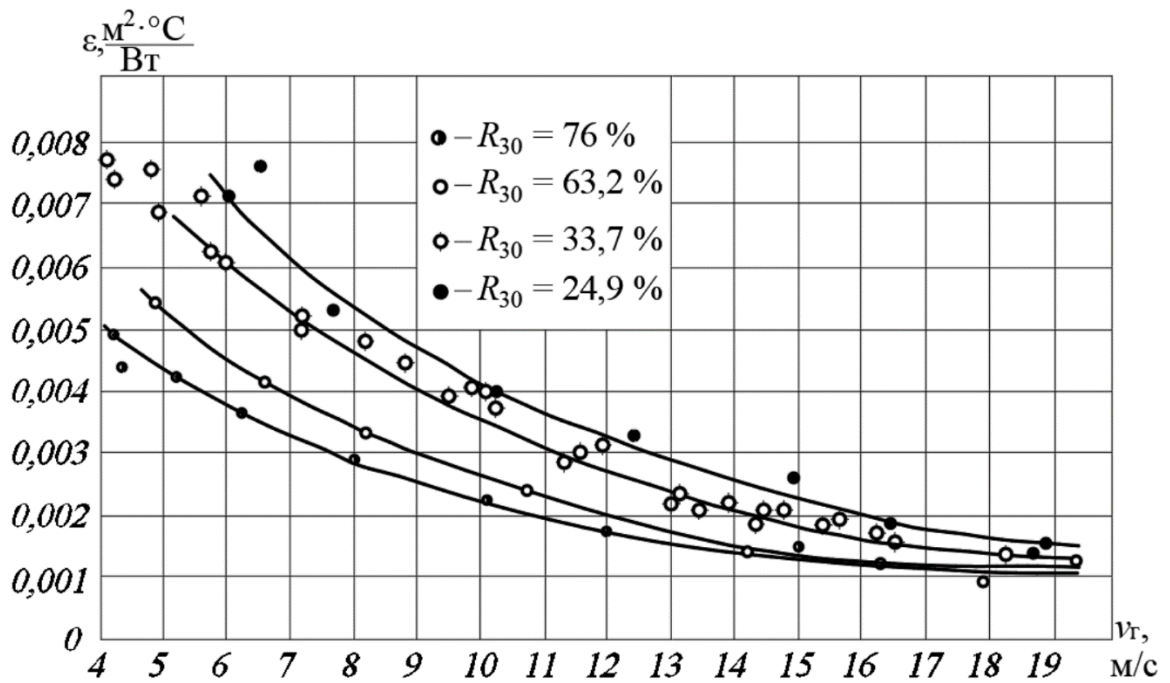


Рис. 2.15 – Зависимость коэффициентов загрязнения от содержания в составе летучих частиц с фракцией более 30 мкм при шахматной схеме размещения труб в пучке при $s_1/d_H = s_2/d_H = 2$, $d_H = 38$ мм [53]

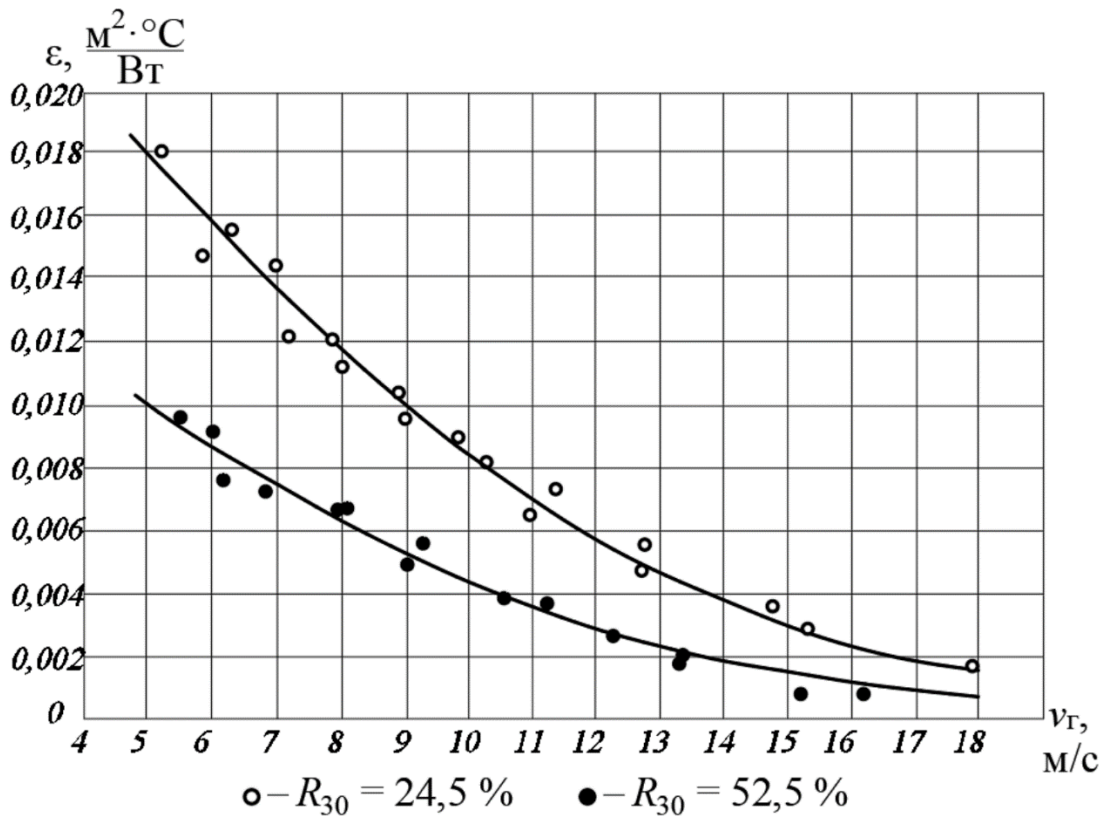


Рис. 2.16 – Зависимость коэффициентов загрязнения от содержания в составе летучих частиц с фракцией более 30 мкм при коридорной схеме размещения труб в пучке при $s_1/d_H = s_2/d_H = 2$, $d_H = 38$ мм [53]

ности осаждения и возврату их обратно в поток [113].

Частицы разной плотности и размера могут обладать разными величинами кинетической энергии и инерции, поэтому, при входе в конвективные пучки частицы больших размеров движутся преимущественно без изменения траекторий и в случае контакта их с трубой разрушают слой отложений в месте контакта [154]. Частицы малого размера обладают малой инерцией и практически не отклоняются от движения по линиям тока, а при встрече с поверхностью труб часто при движении отклоняются в сторону. Средние по размерам частицы преимущественно выпадают из потока и оседают на поверхности теплообменных труб [34].

Коэффициент, учитывающий влияние размера фракций летучих частиц, может быть найден [53] по зависимостям:

– для труб конвективного пучка с шахматной схемой размещения труб

$$c_{\text{фр}} = 1 - 1,181g \frac{R_{30}}{33,7}, \quad (2.12)$$

– для труб конвективного пучка с коридорной схемой размещением труб

$$c_{\text{фр}} = 1 - 1,71g \frac{R_{30}}{33,7}, \quad (2.13)$$

где R_{30} – количество твердых частиц, оставшихся после просеивания на сите с размером ячейки 30 мкм, %.

Распределение фракций в составе летучей золы обусловлено распределением минеральных компонентов в угольном топливе и спецификой процесса подготовки, подачи и сжигания твердого топлива [54].

Концентрация частиц вдоль поверхности трубы является важным параметром для прогнозирования распределения толщины отложений по периметру труб [123]. На рис. 2.17 показана доля частиц от общей их концентрации в потоке с равномерным распределением частиц во входном сечении. Неравномерность распределения концентрации частиц в потоке обусловлена эффектами турбулентности, где видно, что крупные частицы менее чувствительны к

турбулентным колебаниям потока [123]. Также можно отметить, что максимум находится в точке уменьшения скорости перед фронтальной стороной трубы и уменьшается с увеличением угла атаки трубы частицей [124].

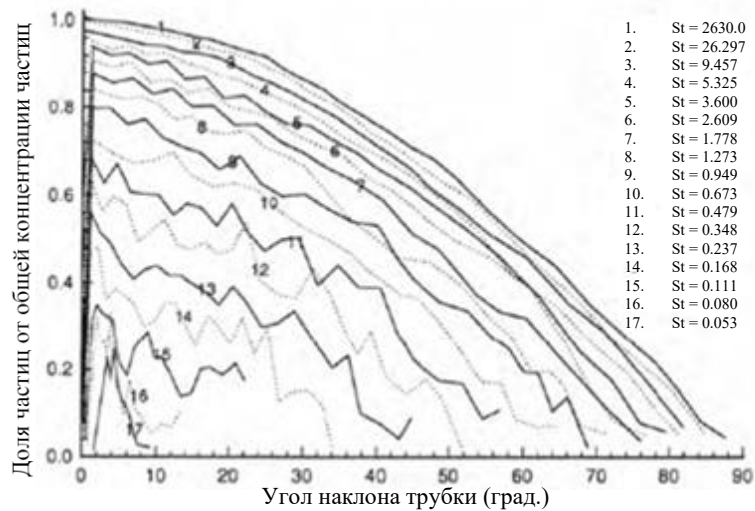


Рис. 2.17 – Нормализованная концентрация частиц в запыленном потоке [77]

Проведенное обобщение [53] зависимостей коэффициентов загрязнения от диаметра труб, схем их размещения, относительного продольного шага σ_2 , скорости и направления движения потока продуктов сгорания, фракционного состава золовых частиц, выявило ряд зависимостей для нахождения коэффициентов загрязнения при работе конвективных пакетов на лабораторном испытательном стенде в различных условиях:

– для конвективных пучков с шахматной схемой размещения труб и направления движения дымовых газов «сверху-вниз»:

$$\varepsilon_{\text{лаб}}^{\text{III}} = 0,0126 \left(1 - 1,181g \frac{R_{30}}{33,7} \right) \left(1 + 31g \frac{d_{\text{н}}}{38} \right) \cdot 10^{-xv_{\Gamma}} ; \quad (2.14)$$

– для конвективных пучков с коридорной схемой размещения труб и направления движения дымовых газов «сверху-вниз»:

$$\varepsilon_{\text{лаб}}^{\text{III}} = 0,039 \left(1 - 1,71g \frac{R_{30}}{33,7} \right) \left(1 + 3,31g \frac{d_{\text{н}}}{38} \right) \cdot 10^{-0,08v_{\Gamma}} ; \quad (2.15)$$

– для конвективных пучков с шахматной схемой размещения труб и направления движения дымовых газов «снизу-вверх»:

$$\varepsilon_{\text{лаб}}^{\text{ш}} = 0,01386 \left(1 - 1,181g \frac{R_{30}}{33,7} \right) \left(1 + 31g \frac{d_{\text{н}}}{38} \right) \cdot 10^{-xv_{\text{г}}} . \quad (2.16)$$

2.3. Выводы по разделу 2

1. Выявлено, что процесс осаждения летучей золы разделяется на пять основных этапов: преобразование неорганических компонентов топлива, транспортировка частиц летучей золы к поверхностям нагрева котлов, закрепление частиц летучей золы на поверхностях труб или слое отложений, удаление осажденных частиц с поверхности слоя, взаимодействия между осажденными частицами на поверхности и уплотнение слоя натрубных отложений;

2. Определены основные факторы, влияющие на образование сыпучих и связанных шлаковых отложений: тепловые и аэродинамические условия работы конвективных поверхностей нагрева (скорость и направление движения потока продуктов сгорания, температура продуктов сгорания и стенки труб), условия эксплуатации поверхностей нагрева (размер и концентрация частиц, коэффициент избытка воздуха), геометрические характеристики конвективного пучка (диаметр и шаг труб в пучке);

3. Выявлено, что скорость образования сажистых и золовых натрубных отложений является функцией вероятности прилипания как числа ударяющих частиц, так и характера поверхности отложений. Вероятность прилипания ударяющейся о поверхность трубы частицы в основном определяется: вязкостью частиц, поверхностным натяжением, силой и углом атаки поверхности, а также химическим и физическим состоянием поверхности отложений.

3. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ОБРАЗОВАНИЯ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

3.1. Характеристики объекта исследования

Основной задачей экспериментальных исследований конвективных пакетов твердотопливных котлов является выявление формы поверхности натрубных отложений, образовавшихся в период эксплуатации котлов в течение отопительного сезона. Обследование выполнено на действующем оборудовании, выведенном из работы в неотапительный период года в натуральных условиях. Натурный эксперимент выполнялся после полного завершения охлаждения всех элементов котлоагрегатов.

Исследовались два твердотопливных (угольных) котлоагрегата КВу-1,0 номинальной тепловой мощностью 1,0 МВт с механизированными слоевыми топками, установленных в котельной, принадлежащей эксплуатирующей организации ООО «Леноблтеплоснаб», расположенной по адресу: д. Хвалово, стр. 137, Хваловское сельское поселение, Волховский район, Ленинградская область. Топочные устройства котлов предназначены для сжигания угля марки ДО («Длиннопламенный Орех») с размером гранул от 20 до 50 мм [44].

Исследование конвективных пакетов производилось через обслуживающие лючки, размещенные в боковой и задней панелях обшивки котлоагрегатов (рис. 3.1). Измерение толщины слоя образовавшихся на наружных поверхностях труб отложений проведено в 8 точках по окружности в полярных координатах (см. рис. 3.1 *в, г*). Наружный диаметр конвективных труб котлов $d_n = 48$ мм; относительный поперечный шаг размещения труб в ряду $\sigma_1 = 1,98$; относительный продольный шаг размещения рядов труб в пучке $\sigma_2 = 2,6$ [44].

Особенностью компоновки теплообменных блоков в конструкции конвективных пакетов у котлоагрегатов КВу-1,0 является наличие

разделительной межсекционной перегородкой (см. рис. 3.1 з) разделяющей пакет на две секции за исключением прохода, организующего в нижней части

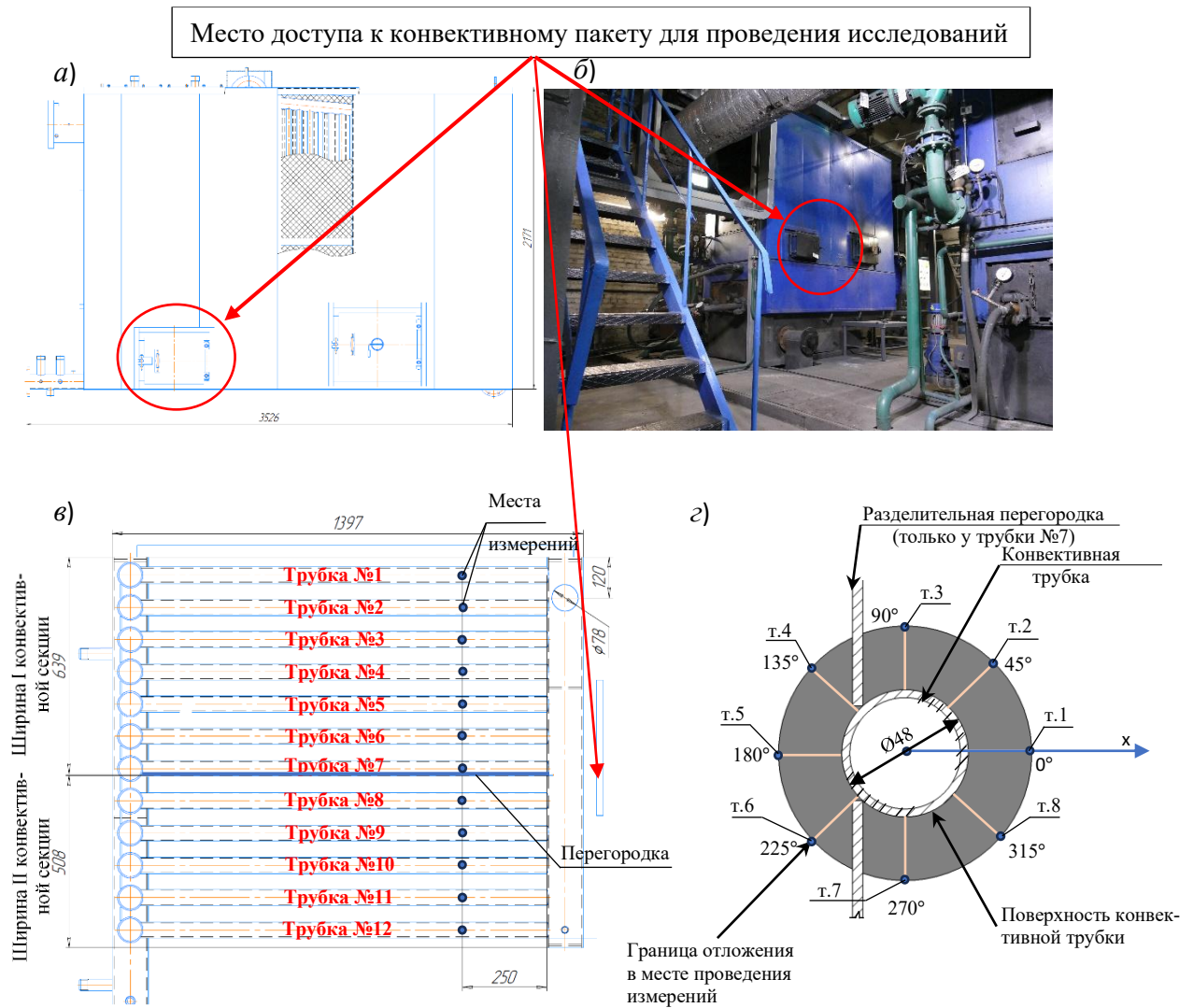


Рис. 3.1. Схема проведения исследований: а) – боковой вид котла КВу-1,0; б) – изображение бокового вида котла КВу-1,0, установленного в отопительной котельной; в) – схема расположения труб в конвективных секциях котлоагрегата КВу-1,0; г) – точки мест проведения измерений толщины отложений

пучка поворотную камеру для перетока дымовых газов из первой конвективной секции с трубами №1–7 во вторую с трубами №8–12. В секциях конвективных пакетов предусмотрено две различные схемы движения дымовых газов: в первой секции, установленной за топкой – направление движения «сверху-вниз»; во второй секции – направление движения «снизу-вверх». Такая особенность конструкции конвективных пакетов дает

возможность исследовать влияние на форму образующихся отложений смены направления движения потока дымовых газов.

Во избежание в процессе проведения измерений случайного обрушения рыхлого слоя натрубных отложений измерения отложений на трубах №2–11 нижнего ряда труб проводится на расстоянии 250 мм от места врезки труб в коллектор (стояк) конвективного пакета [44].

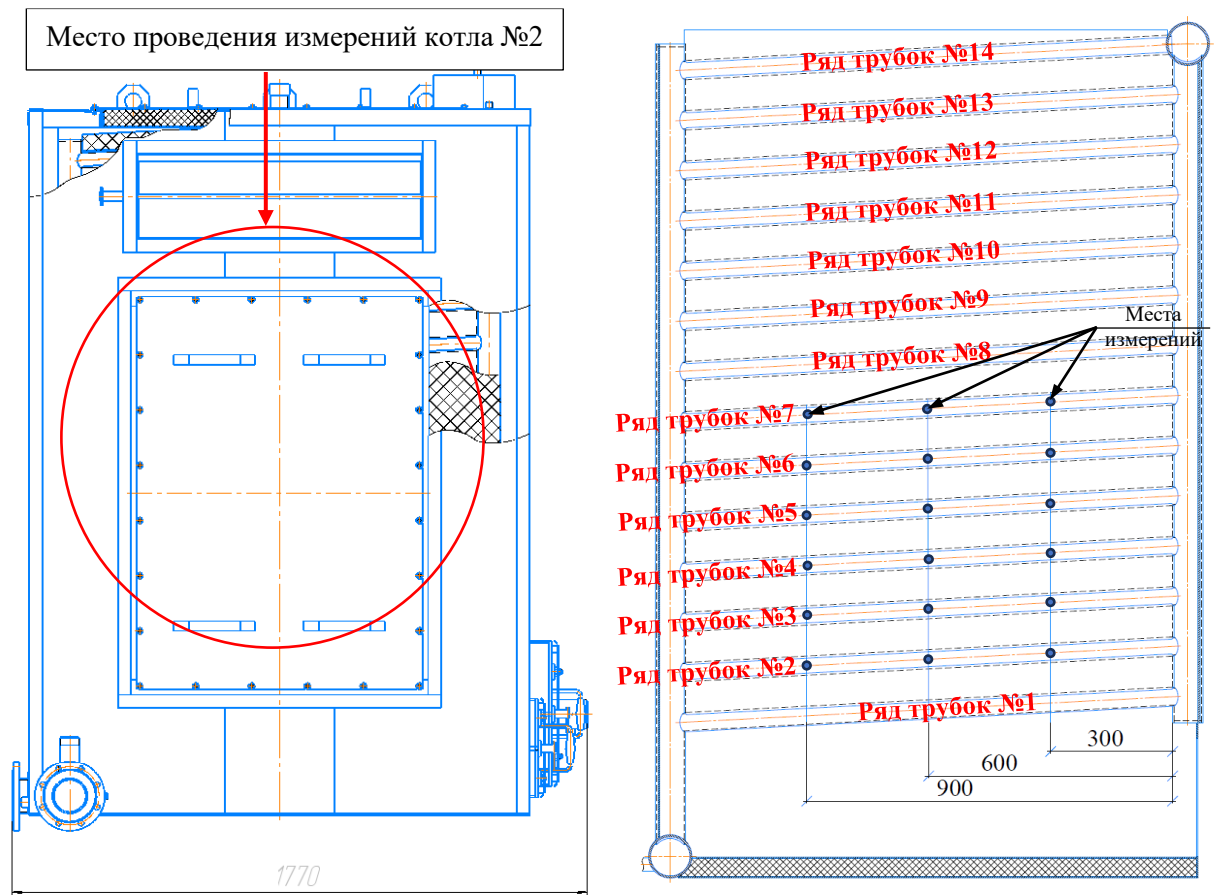


Рис. 3.2 – Схемы котлоагрегата КВу-1,0: а) – задняя часть котла со снимаемым техническим люком; б) – ряды конвективных труб.

Второй этап исследований состояния конвективных секций котла №2 осуществлялся через люк в газоплотных панелях обшивки на задней стенке котлоагрегата №2. Место доступа для проведения исследований показано на рис. 3.2, а.

3.2. Методика проведения натурального эксперимента по определению толщины натрубных отложений

Для определения толщины (профиля) слоя отложений на наружной поверхности конвективных труб можно использовать прибор для измерения толщины слоя сыпучих материалов в технологических емкостях (Патент РФ №2557600) [75]. Измерительный прибор имеет специально разработанную конструкцию, отличающуюся от подобных ему штангенглубиномеров, которая позволяет использовать его внутри технологических емкостей с ограниченными внутренними размерами (стесненных условий). Отличительной особенностью конструкции прибора являются то, что «штанга прикреплена параллельно к стойке с вертикальной шкалой, стойка прикреплена к рейке с размещенной на ней горизонтальной шкалой, подпружиненным зажимом и съемным ограничителем». Использование подобных приборов связано в случае с риском возможного разрушения (обрушения) слоя отложений в местах проведения замеров, что может существенно отразиться на точности данных [64].

Для определения толщины натрубных отложений и их профиля вокруг трубок также можно использовать камеру с ПЗС-матрицей (*CCD*, прибор с зарядовой связью) [108, 126, 151]. ПЗС-матрица, используемая в цифровых камерах для проведения исследований, является устройством для последовательного считывания информации, преимуществом которой является высокое соотношение позиций «сигнал/шум», что улучшает способность к различению структуры слоя в условиях низкой освещенности мест проведения измерений [109]. Захваченные ПЗС-матрицей фотоны генерируют электрические заряды, хранящиеся в потенциальной яме [109]. Далее, хранящиеся заряды усиливаются и считываются последовательными регистрами сдвига.

При проведении натурального эксперимента для определения профиля натрубных отложений использована схема [126], включающая камеру с ПЗС-матрицей для передачи полученных изображений внутренних отложений на устройство вывода цифровых данных в режиме реального времени. Так как

поверхность труб в чистом состоянии и поверхность натрубных отложений обладают различными значениями цветов в системе *RGB*, то для определения площади сечения, занимаемой отложениями проводится дальнейшая постобработка изображений: коррекция гистограмм изображений для расширения динамического диапазона; улучшения контрастности изображения; преобразование цветных изображений в бинарное (имеющего градации только черного и белого цветов); вычисление числа пикселей изображений, присущих слою отложений [140].

Еще одним доступным для измерения толщины натрубных отложений способом, выбранным для проведения натурных исследований, является использование градуированного предмета малого диаметра (иголки с нанесенными делениями миллиметровой шкалы).

Измерение толщины образовавшихся отложений на наружной поверхности трубок проведено в 8 точках: с четырех сторон трубок к боковой, тыльной, фронтальной, и под углом 45° к стенке трубки с каждой стороны (см. рис. 3.1, з).

В данной работе точки измерения т.6, т.7, т.8 отнесены к фронтальной стороне трубы, точки измерения т.1 и т.5 к боковым поверхностям труб, а точки измерения т.2, т.3, т.4 относятся к тыльной стороне конвективных труб [113].

При проведении натурных измерений разработана последовательность действий определения толщины отложений на наружной поверхности трубок по секциям конвективного пакета:

1. Очистка наружной поверхности части конвективной трубки рядом с местом измерений (см. рис. 3.3, а);
2. Размещение цифровой камеры у места проведения измерений;
3. Получение цифровых изображений (см. рис. 3.3, в);

4. Проведение постобработки полученных изображений с помощью компьютерного программного обеспечения для наложения сетки с размером ячейки в 1 пиксель (см. рис. 3.3, б, з);

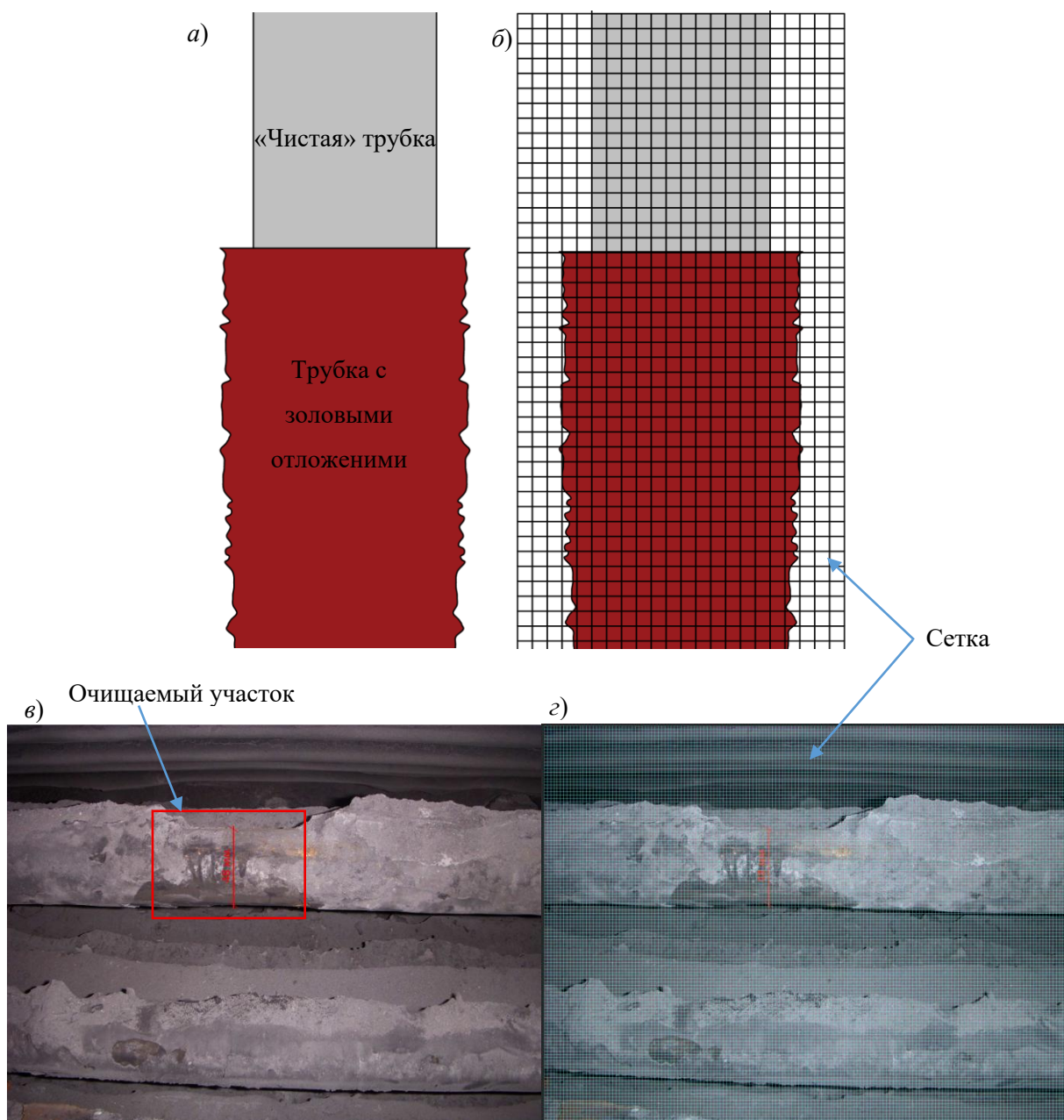


Рис. 3.3 – Технология определения толщины отложений: а) – принципиальная схема загрязненной трубы с очищенным от отложений участком; б) – схема с наложенной на изображение сеткой с разрешением в 1 пиксель; в) – изображение загрязненной трубы с очищенным участком; з) – изображение с наложенной сеткой

5. Определение соответствия между количеством пикселей полученного изображения и реального размера исследуемого элемента (мм);

6. Определение количества пикселей, приходящихся на конвективную трубку с чистой поверхностью;

7. Определение количества пикселей, приходящихся на трубку с отложениями.

8. Определение размера отложения.

Изображения конвективных труб с накопленными на их наружной поверхности за отопительный сезон отложениями сделаны с помощью цифровой фотокамеры *Nikon COOLPIX S51* (с разрешением 8,1 млн. пикселей, фокусным расстоянием 6,3–18,9 мм, диафрагменным числом $f/3,3-4,2$, чувствительностью установленной в позицию «Авто» в диапазоне от 100 до 800 единиц *ISO* и включенной встроенной вспышкой).

3.3. Планирование эксперимента по определению толщины отложений

Одним из наиболее применяемых методов математического планирования и обработки натуральных экспериментов является метод факторного планирования, предложенный Р. Фишером [66]. В методе факторного планирования исследования ведутся в соответствии с составленным заранее планом, отражающим в совокупности экспериментов сочетания всех исследуемых факторов и их взаимодействие между собой.

Одной из задач исследований конвективных пакетов заключается в получении на основе результатов натурального исследования математической зависимости толщины отложений. Под функцией отклика понимается толщина накопленных за отопительный период слоя натрубных отложений на поверхности труб №1 в каждом ряду пакета (мм). Ожидается, что значение толщины будут находиться в зависимости от следующих факторов: Z_1 – номер ряда конвективных труб; Z_2 – расстояние от боковой стенки котла до точки проведения измерений, мм; Z_3 – угол точки измерений на тыльной стороне поверхности труб в полярной системе координат, °.

Верхний и нижний уровни каждого фактора, их основной уровень, а также интервал варьирования фактора в эксперименте представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Кодирование факторов эксперимента

Факторы	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Z_1	2	4	6	2
Z_2	300	600	900	300
Z_3	45	90	135	45
Кодированные значения факторов	-1	0	1	1

Зависимость кодированной величины от натуральной (истинного значения) определяется по уравнениям:

$$X_1 = \frac{Z_1 - 4}{2}, \quad X_2 = \frac{Z_2 - 600}{300}, \quad X_3 = \frac{Z_3 - 90}{45} \quad (3.1)$$

В таблице 3.2 представлена матрица планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2^3 [60, 66, 97]. Количество факторов равно 3, соответственно количество экспериментов равно 8. Символ «+» в строчках таблицы означает, что в эксперименте фактор принимает значение, равное значению на верхнем уровне, а символ «-» в строчках таблицы означает, что фактор принимает значение, равное значению на нижнем уровне.

Таблица 3.2 – Матрица планирования натурального эксперимента

№ эксперимента	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

3.4. Постановка задачи численного моделирования

Численный анализ процессов формирования отложений на наружной поверхности труб конвективных пакетов производился в программном комплексе для численного моделирования *ANSYS Fluent*. С его помощью можно успешно моделировать ход физических процессов при движении запыленных сред, используя модели: турбулентности, теплообмена, массообмена в каплях и частицах, химических реакций, движения многофазных потоков и пр. Программное обеспечение обладает всеми необходимыми возможностями для научного изучения хода физических и химических процессов, а также визуализации представления результатов численного моделирования для последующего проведения комплексного анализа [10].

Для моделирования процессов движения текучих сред широко используются $k-\varepsilon$ и $k-\omega$ модели турбулентности [120, 151, 153, 75]. Для постановки задачи численного моделирования движения потоков с высоким содержанием твердых частиц использовалась гибридная $k-\omega$ модель модификации *SST* (модель Ментора). Эта гибридная модель работает без пристеночных функций, используя преимущества как $k-\varepsilon$, так и $k-\omega$ моделей турбулентности. Для достижения необходимой точности численного моделирования движения ламинарно-вязких пристеночных течений, а также создания условий выполнения пользовательских функций, содержащих математические модели, поведения твердых частиц вблизи пристеночной области, потребовалось создание вблизи границ типа «стенка» подробной сетки с высоким разрешением. В модели турбулентности $k-\omega$ *SST* решается только два уравнения без пристеночных функций, поэтому вычислительные затраты для численного моделирования не велики [117].

Для решения уравнений турбулентности при настройке математического решателя использовался «раздельный» алгоритм связки давления и скорости SIMPLE [55, 117]. Для расчёта траекторий движения твердых частиц,

движущихся в запыленном газовом потоке, использовалась дискретно-фазовая модель (*DPM*). Операция отслеживания траекторий движения твёрдых частиц производилась с использованием односторонней связи между дискретной фазой и дисперсной средой. При настройке модели дискретных фаз для учёта комплексного силового воздействия на движущиеся в потоке частицы активированы опции, позволяющие при моделировании дополнительно учесть влияние отдельно взятых сил: термофоретическую силу (*Thermophoretic Force*); подъемную силу Саффмана (*Saffman Lift Force*); силу воздействия присоединённой массы (*Virtual Mass Force*); силу градиента давления (*Pressure Gradient Force*). Так же учтено влияние на частицы сил тяжести. В турбулентных потоках на траектории движения частиц также оказывает существенное влияние явления флуктуации (мгновенные отклонения скорости частиц, возникающие при их столкновении) [31, 41]. Если в физике движения частиц не учесть влияние турбулентной диффузии потока, тогда значительная доля частиц будет концентрироваться у фронтальной стороны поверхности трубок, и почти не будет наблюдаться их столкновения со стенками, вследствие влияния эффекта ламинарного обтекания границ. *DRW* (дискретизированной модели случайного блуждания) и *CRW* (непрерывная модель случайного блуждания) являются в численном моделировании двумя широко используемыми подходами к генерации мгновенных флуктуаций скорости [125]. В дискретизированной модели случайного блуждания генерируемое мгновенное колебание скорости потока поддерживается постоянным в течение всего срока существования вихря [125]. По истечении этого времени возникает новая флуктуация скорости, независимая от предыдущей. Во время каждого этапа взаимодействия частиц с потоком к компонентам вектора скорости потока добавляется псевдослучайное число, генерируемое на основе нормального распределения по Гауссу. Модель *CRW* обходит дискретный результат, используя уравнение Ланжевена. Хотя модель *CRW* вводит турбулентные колебания, более похожие

на экспериментальные данные, характеристики моделей *DRW* и *CRW* примерно одинаковые. Модель *CRW* требует более высоких затрат вычислительных ресурсов, чем модель *DRW*.

При выполнении численного моделирования для упрощения расчетов и снижения затрат времени на моделирование сделаны следующие допущения:

- частицы являются невращающимися инертными (без учета влияния химического состава) частицами сферической формы;
- весь объем частиц имеет одинаковую температуру [111];
- агломерация частиц и соответственно влияние эффектов, создаваемых агломерацией частиц в модели не учитывается;
- стенки трубок конвективных пакетов не имеют шероховатости [134];
- эффект выбивания крупными частицами доли сформировавшихся слоев отложений при моделировании не учитывается [111, 141];
- не учитывается влияние конденсации паров на процесс формирования отложений, так как по данным исследований [132] количество осажденных частиц, вызванных конденсацией паров составило не более 0,1 % от общей массы осажденных частиц.

Заданные в численной модели граничные условия показаны на рис. 3.4. Так же подключены пользовательские функции *UDF* с макросами для расчета плотности, теплопроводности, динамической вязкости продуктов сгорания в зависимости от тепловых условий.

При постановке задачи численного моделирования скорость вводимых через границу *Inlet* в расчетную область частиц золы совпадает со скоростью движения транспортирующего их газового потока на границе *Inlet*. В условиях работы котлоагрегатов, концентрация летучей золы в объеме продуктов сгорания незначительна для оказания существенного воздействия на характер движения потока продуктов сгорания [63], поэтому, при поставке задачи численного моделирования не учитывалось влияние частиц золы на движение га-

зового потока. Протяженность участка расчетной области модели за последним рядом конвективных трубок принята такой длины, чтобы в выходную границу *Outlet* не попадала зона обратных токов (зона отрывных течений) [63].

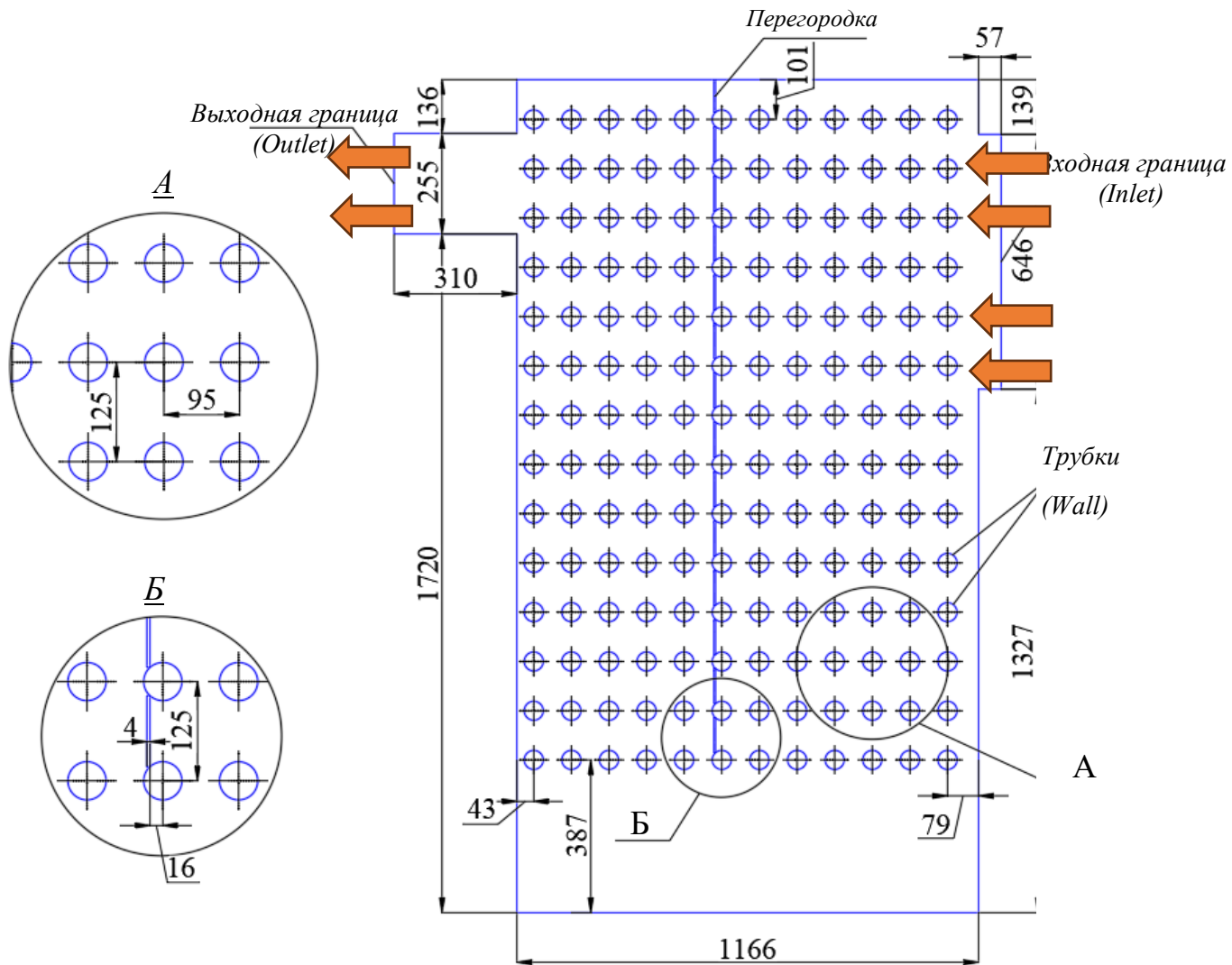


Рис. 3.4 – Геометрическая модель секций конвективного пакета котла КВу-1,0 с границами

На границе *Outlet* задано граничное условие избыточного давления. Термическое сопротивление стенок конвективных труб в расчетах теплопередачи не учитывалась, а температура их наружной поверхности принята постоянной величиной равной средней температуре теплоносителя в котлоагрегате 82,5 °С. Границам типа «*Wall*» (стенка) в модели назначены граничные условия: отсутствия проскальзывания потока (*No Slip*), адиабатическая граница, отра-

жение частиц при столкновении с границей (*Reflect polynomial*) [94, 125]. Установка граничного условия как адиабатической границы может дать некоторое расхождение с реальными данными, так как в действительности могут оказывать влияние потери теплоты через наружные ограждения секций конвективного пакета.

На рис. 3.5 представлена расчетная сетка для расчетной области конвективного пакета. Расчетная сетка состоит из треугольных геометрических элементов с максимальным размером 5 мм. Для получения более точного решения при выполнении численного моделирования затухания турбулентных вихрей вблизи поверхности конвективных трубок и взаимодействия с ними частиц золы расчетная сетка дополнена областями сгущения сетки толщиной в 5 мм [132]. Вдоль окружности конвективных труб было создано 100 граней сетки [138, 146].

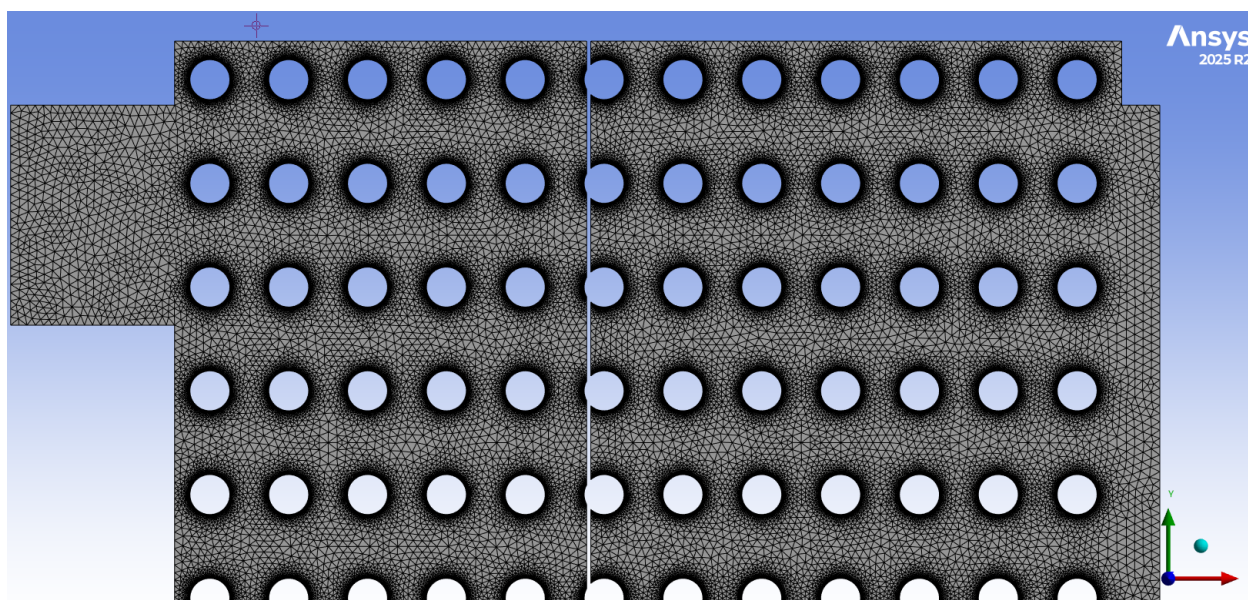


Рис. 3.5 – Фрагмент конвективного пакета с расчетной сеткой

Концентрация золовых частиц в объеме продуктов сгорания определяется по зависимости [33]:

$$\mu_{зл} = \frac{A^p a_{ун}}{100G_{\Gamma}}, \quad (3.2)$$

где A^p – зольность рабочего состава топлива, %; G_T – удельный вес продуктов сгорания, кг/кг; a_{yn} – доля золы топлива, выносимая потоком продуктов сгорания из топочного объема.

Зависимость (3.2) позволяет определить только среднее значение концентрации золовых частиц по сечению газохода, но при анализе образования золовых натрубных отложений большее влияние оказывают локальные концентрации золошлаковых частиц в зонах наиболее вероятного осаждения частиц [33].

Для снижения активности процессов осаждения частиц предложены некоторые варианты конструкции трубок, отличающиеся формой профиля поперечного сечения наружной поверхности от круглой [27, 28, 29, 78, 113, 137]. Трубка с эллиптической формой профиля поперечного сечения оказалась на 68,8 % менее подвержена загрязнению золовыми частицами [113]. Трубки с конусоидальной формой поперечного сечения с углом при вершине осевого сечения конуса менее 90° зона с малой активностью турбулентных вихрей занимает меньшую площадь чем у круглых трубок, тем самым снижается активность процессов осаждения [102]. Конструкция теплообменника с пучком трубок разного диаметра в ряду трубок также помогает снизить активность процессов осаждения [129]. Анализ форм поперечного сечения трубок показал, что трубки с эллиптической и приплюснутой с боков (рис. 3.6) формами профиля поперечного сечения также наименее подвержены процессам загрязнения поверхности [149].

На основании проведенного анализа эффективности использования трубок с различными формами профиля поперечного сечения наружной поверхности предложена эффективная форма трубок для использования в секциях конвективных пакетов водотрубных котлов малой мощности (рис. 3.7).

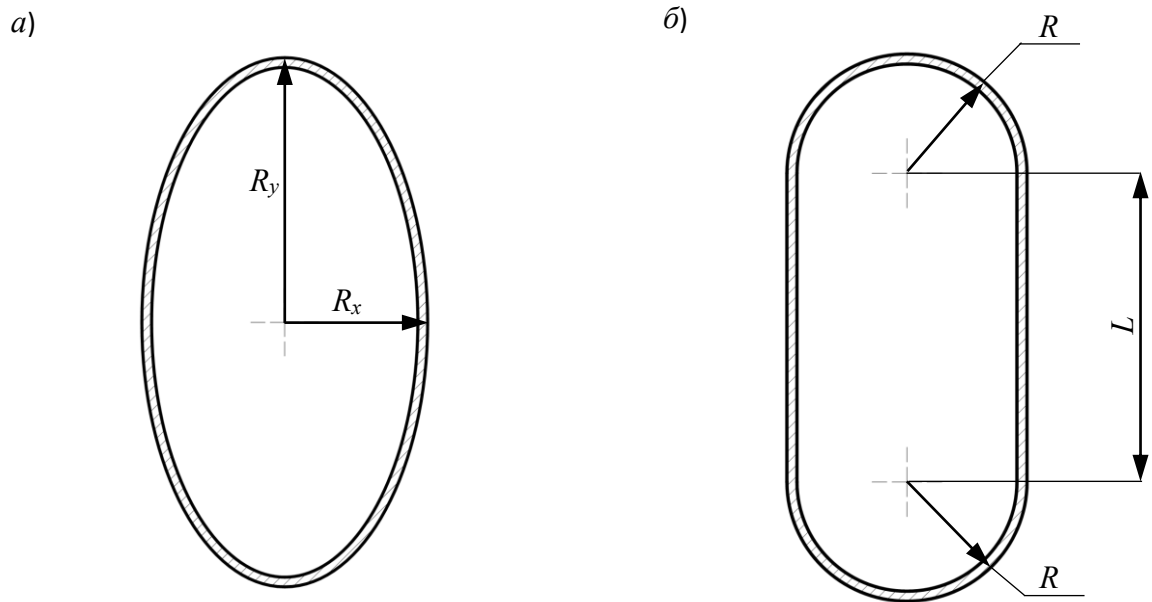


Рис. 3.6 – Схемы трубок с отличной от круглой форм поперечного сечения наружной поверхности: а) – эллиптической; б) – приплюснутой с боков

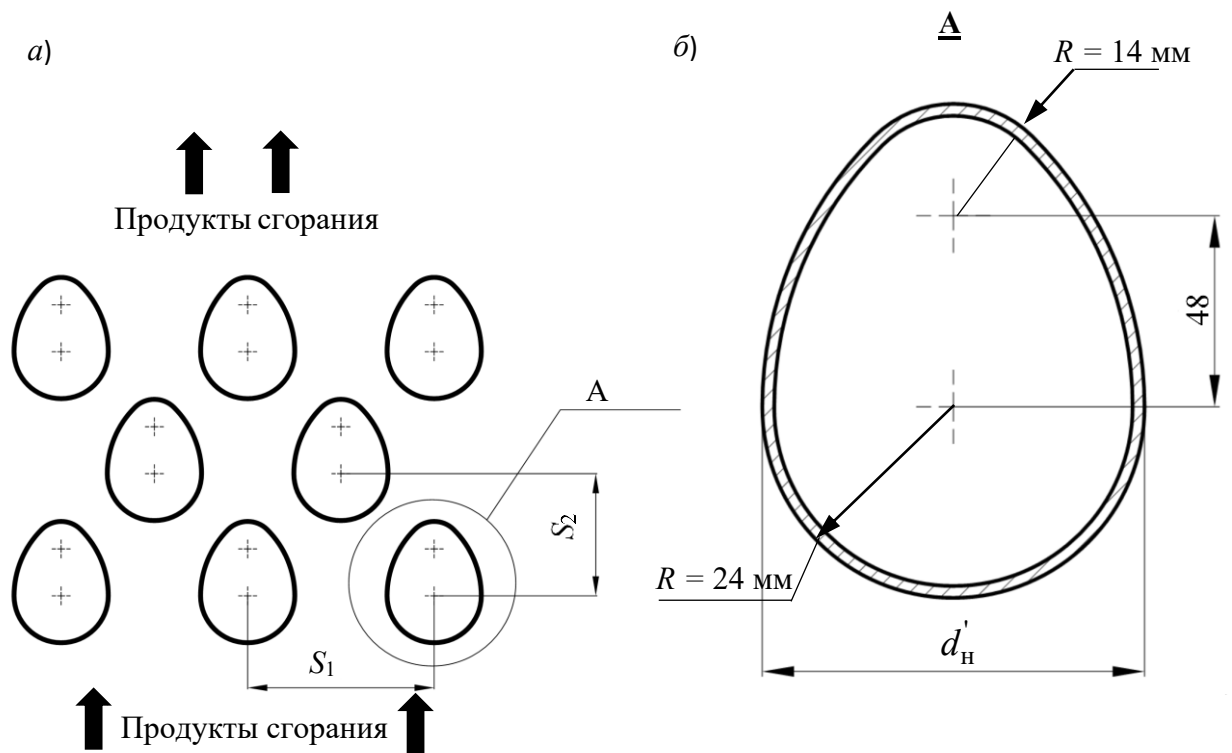


Рис. 3.7 – Конвективный пакет с трубками овоидальной формы профиля поперечного сечения наружной поверхности: а) – схема расположения трубок в конвективном пакете; б) – предложенная форма профиля наружной поверхности трубок

При изготовлении трубок с овоидальным профилем сечения методом волочения из круглых трубок геометрические характеристики сечения изменятся и $\sigma_1 = S_1/d_n$ увеличится. Для сохранения σ_1 между численными моделями с трубками круглой и овоидальной форм профиля поперечного сечения наружной поверхности принято, что овоидальные трубки изготавливаются из труб большего диаметра методом волочения таким образом чтобы наружный диаметр d'_n трубы с овоидальной поверхностью (рис. 3.6, б) по размеру совпадал с трубками круглой формы. Соответственно, количество трубок в конвективных блоках котла при сохранении площади поверхности нагрева уменьшится и составит 132 трубы, расположенных в 11 рядов по 12 трубок.

Для котла мощностью 0,93 МВт, работающего на угольном топливе марки ДО с теплотой сгорания 22818 кДж/кг (5450 ккал/кг), расход топлива составил 176,6 кг/ч при КПД котла по режимной карте 83,1 %, зольность топлива составляет 9,2 %. Это дает выход летучей золы с продуктами сгорания в количестве 16,25 кг/ч (0,0045 кг/с). Так как при моделировании рассматривается двухмерная постановка задачи, то через участок проходного сечения расход золы составит $2,049 \cdot 10^{-6}$ кг/с, что было задано в качестве граничного условия. Распределение частиц по размерам в модели осуществлялось применением уравнения распределения фракций Розина-Раммлера с параметром распределения (*Spread Parameter*) равным 0,729 по 9 размерам [103]. Подача частиц осуществляется с периодом по каждому временному шагу через границу *Inlet* равномерно по всей ее площади. Физические характеристики частиц, принятые при выполнении численного моделирования, представлены в Таблице 3.3.

При численном моделировании в качестве граничных условий для поверхности трубок обычно устанавливают свойства, характерные либо для абсолютно чистой поверхности стенки, либо для полностью загрязненной поверхности стенки [146]. В действительности поверхность трубок не является как абсолютно чистой, так и полностью загрязненной, а представляет собой сложную комбинацию из чередующихся между собой участков с относительно

Таблица 3.3 – Физические характеристики частиц принятые
при численном моделировании

Характеристика частиц летучей золы	Процент нагрузки котла, %		
	40	70	100
Температура, °С	540	707	806
Начальная скорость, м/с	0,44	0,92	1,44
Плотность, кг/м ³	2300		
Максимальный диаметр, мм	0,1		
Минимальный диаметр, мм	0,0025		
Средний диаметр, мм	0,016		

чистыми и загрязненными областями. Таким образом, численные модели с учетом всех факторов не могут в точности спрогнозировать ход процесса осаждения частиц на теплообменной поверхности конвективных пакетов, так как физические параметры у материала стенок труб («чистая» поверхность) и у загрязняющего вещества (слоя отложений) различаются, что оказывает разное влияние на процессы адгезии и агломерации частиц. В данной работе при моделировании осаждения принята концепция чистой поверхности конвективных трубок.

Натурное обследование состояния поверхностей трубок проводилось на выведенных из работы котлах, установленных в п. Хвалово, Ленинградской обл. после завершения отопительного сезона 2023/2024 года. Однако, в численном моделировании полный период продолжительности эксплуатации поверхности нагрева котлов исследовать целиком не представляется возможным. Поэтому, принято решение ограничить время моделирования моментом достижения формы профиля отложений на трубках нижнего ряда конвективного пакета аналогичной полученному при выполнении измерений в ходе натурного эксперимента.

В процессе формирования слоя отложений на поверхности трубок наружная поверхность теплообмена с учетом толщины слоя отложений и их

формы геометрически изменяется с круглой формы поперечного сечения на геометрию неправильной формы, поэтому для моделирования формы поверхности слоя отложений использовался метод динамической сетки (*Dynamic Mesh*), реализованный [115] с макросом *DEFINE_GRID_MOTION*. Создание динамически перестраиваемой сетки используется в сочетании с алгоритмами перестроения *Smoothing* (сглаживание) и *Remeshing* (локальное перестроение) для получения более качественной согласованной сетки в расчетных областях, удовлетворяющей математическим критериям качества сетки, требующихся для точности и стабильности расчетных операций. Сильное искажение элементов сетки на границах при ее перестроении может привести к появлению отрицательных объемов ячеек и аварийному прерыванию работы программы [98]. Появление сильных искажений расчетной сетки обычно связано с сильным неоднородным отложением частиц на узких участках поверхности трубок.

Стандартный функционал модуля *ANSYS Fluent* для задания граничных условий на стенках не позволяет моделировать формирование отложений частиц. Для задания граничных условий взаимодействия частиц со стенками конвективных трубок использовались пользовательские функции (*UDF*), содержащие математическую модель физики осаждения частиц и записанную в макрос *DEFINE_DPM_BC*. Вычисляемые в макросе *DEFINE_DPM_BC* значения заносятся в ячейки выделенной пользовательской памяти *C_UDMI*, где сохраняются, а, далее, используются макросом *DEFINE_GRID_MOTION* для вычисления расстояний перемещения узлов сетки от прежней границы на новое их положение. Заложённая математическая модель определяет количество и массу частиц в ячейке пользовательской памяти, а, следовательно, и толщину отложения.

Программный листинг записанных на языке «С» макросов представлен в Приложении Г.

Модель осаждения, основанная на критической скорости осаждения, учитывающая влияние сил адгезии, деформацию частиц, участие внешних сил Ван-дер-Ваальса, предсказывает, что прилипание произойдет, когда нормальная составляющая скорости столкновения частиц будет меньше критической скорости, определяемой по зависимости (3.3) [115, 121, 125, 136]. В математической модели для определения рассеиваемой при столкновении энергии частиц используется теория Джонсона-Кендала-Робертса (*JKR*) и физические законы столкновения частиц (перераспределения энергии и импульса, изменении формы и строения частиц).

$$v_{p,cr} = \left(\frac{2K \left(1 + \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} \right)^2 \right)}{d_p R^2} \right)^{10/7}, \quad (3.3)$$

где d_p – диаметр частиц, м; R – коэффициент восстановления, равный 0,9; φ – угол столкновения частиц с поверхностью осаждения, рад; K – параметр, зависящий от свойств материалов стенки трубы и золowych частиц, определяется по зависимости (3.4):

$$K = 0,51 \left[\frac{5\pi^2 (k_s + k_p)}{4\rho_p^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{2}{5}}, \quad (3.4)$$

где ρ_p – плотность частиц, кг/м³; k_s – параметр упругости материала поверхности трубки (стали), находится по зависимости (3.5); k_p – параметр упругости частиц, находится по зависимости (3.6);

$$k_s = \frac{1 - j_s^2}{\pi E_s}; \quad (3.5)$$

$$k_p = \frac{1 - j_p^2}{\pi E_p}, \quad (3.6)$$

где E_s – модуль Юнга для материала труб, $E_s = 7,2 \cdot 10^{10}$ Па; j_s – коэффициент Пуассона для труб, равен 0,34; E_p – модуль Юнга для материала частиц, $E_p = 7,5 \cdot 10^{10}$ Па; j_p – коэффициент Пуассона для частиц, равен 0,17.

Критический угол прилипания $\theta_{p, cr}$ определяется по зависимости [115]:

$$\operatorname{tg} \theta_{p, cr} = \frac{\mu^*}{(32\beta^3)^{1/2}} \sqrt{\frac{E^*}{G^*}}, \quad (3.7)$$

где E^*/G^* – функция коэффициента Пуассона. Для коэффициентов Пуассона (0,2–0,3) соотношение $\sqrt{E^*/G^*}$ принимает значение в диапазоне 2,1–2,2; μ^* – коэффициент трения. Принимаемые значения коэффициента трения находятся в диапазоне 0,2–0,3; β – коэффициент эффективного радиуса контакта [38]. Значения коэффициента принимаются в диапазоне 0,09–0,15.

Как видно из уравнения (3.7), критический угол θ_{cr} при котором может произойти осаждение, зависит в первую очередь от свойств материалов частиц и стенки, а также от кинетической энергии частиц в момент ее столкновения (при направлении, перпендикулярном радиусу трубки – тангенциальном направлении), затрачивающейся на отрыв частицы.

Схема, отражающая углы падения частицы по нормали и критический угол падения, представлена в работе [120].

Для создания математической модели осаждения принято, что при столкновении частиц с поверхностью их осаждение происходит, если $v_p < v_{p, cr}$ (скорость частицы в момент удара меньше критической) и $\theta_p < \theta_{cr}$ (угол, при котором частица ударяется о поверхность меньше критического угла прилипания). Большой угол в точке контакта частицы с поверхностью трубок увеличивает вероятность отскока частицы в направлении по касательной к начальной траектории полета частицы [132].

Если частица не удовлетворяет критериям осаждения, она возвращается обратно в поток продуктов сгорания с обновлёнными параметрами движения (например, изменённой скоростью и направлением после соударения) [115, 121, 125, 136]. Скорость сталкивающейся с поверхностью осаждения частицы уменьшается за счет сил трения о поверхность при ударе под углом к этой поверхности [124]. После отскока частицы могут вновь столкнуться с этой же поверхностью, либо отскочить к поверхности другой трубки. Такое поведение частиц может оказывать влияние на активность процессов осаждения частиц на удаленные трубки в ряду, скрытые за первыми рядами [147].

Также в качестве критерия осаждения может приниматься кинетическая энергия частиц в момент их удара о поверхность и критическая вязкость частиц [115, 121, 136]. В модели осаждения, основанной на кинетической энергии частиц, предполагается, что кинетическая энергия частиц либо полностью перейдет в другие виды энергии в результате явления пластической деформации при столкновении частиц со стенкой (частица прилипнет к стенке (неупругий удар)), либо часть кинетической энергии частицы сохранится и частица отскочит от стенки (упругий удар) [124, 150]. Критическая кинетическая энергия при значении меньше которой будет происходить их осаждение, может быть найдено по зависимости [146, 155]:

$$E_{ERE} = \frac{1}{4}d_T^2(1 - \cos\theta) + \frac{2}{3d_T} - 0,00536d_T^{4,70}(1 - \cos\theta)^{0,591} - 1, \quad (3.8)$$

где d_T – максимальный коэффициент рассеивания, определяемый по зависимости (3.9); θ – угол контакта, определяемый по зависимости (3.11), ° [152].

$$d_T = 1 + 0,259We^{0,317}, \quad (3.9)$$

где We – число Вебера, определяемое по зависимости (3.10).

$$We = \frac{\rho_p v_{p,n}^2 d_p}{\gamma}, \quad (3.10)$$

где ρ_p – плотность частиц, кг/м³; $v_{p,n}$ – скорость частицы по нормали к поверхности осаждения, м/с; d_p – диаметр частиц, м; γ – сила поверхностного натяжения, Н/м.

Угол контакта θ :

$$\theta = \frac{180}{1 + e^{\frac{T_p - 930}{100}}} \cdot \quad (3.11)$$

Из зависимостей (3.8–3.11) следует, что величина критической кинетической энергии в первую очередь зависит от свойств частиц, а также от вида деформации поверхности частицы после столкновения со стенкой.

В модели осаждения, основанной на критической вязкости частиц [111, 125], предполагается, что частица прилипнет к поверхности стенки, если вязкость частицы в момент удара будет меньше их критической вязкости ($\approx 1 \cdot 10^5$ Па·с) [118]. Главной сложностью практического использования для задач численного моделирования модели осаждения, основанной на вязкости, является необходимость нахождения значений критической вязкости, вследствие чего, полученные величины в каждом случае получаются разными, что затрудняет выбор их значений для проведения более точных вычислений. В данной численной модели для температур продуктов сгорания более 800 °С используются температурно-вязкостные зависимости, а для температуры менее 800 °С вязкость золовых частиц принимается константой ($1 \cdot 10^{15}$ Па·с) [142].

3.5. Планирование эксперимента по определению коэффициентов загрязнения

Задачей численного моделирования конвективной поверхности нагрева котлов в условиях запыленного потока продуктов сгорания заключается в получении на основании найденных величин расчетной математической зависимости коэффициентов загрязнения. Под функцией отклика понимается значе-

ние коэффициента загрязнения. Значение коэффициента загрязнения находится в зависимости от следующих факторов: Z_1 – расход продуктов сгорания в конвективном пакете $G_{п.с}$, кг/с; Z_2 – схема расположения труб в пучке (шахматная или коридорная); Z_3 – форма поперечного сечения труб (круглая или овоидальная); Z_4 – относительный поперечный шаг труб, σ_1 (шаг труб в ряду).

От этих факторов зависит активность турбулентных вихрей при движении потока. Углы омывания наружной поверхности труб также окажут влияние на характер распределения отложений загрязняющих частиц.

Верхний и нижний уровни каждого фактора, а также их основной уровень и интервал варьирования фактора в этом моделировании представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Кодирование факторов эксперимента

Факторы	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Z_1	0,091	0,194	0,297	0,103
Z_2	-1	0	1	1
Z_3	-1	0	1	1
Z_4	1,98	2,18	2,38	0,2
Кодированные значения факторов	-1	0	1	1

Для фактора Z_2 за нижний уровень принят шахматный пучок, за верхний уровень принят коридорный пучок. Для фактора Z_3 за нижний уровень принята овоидальная форма профиля поперечного сечения наружной поверхности труб (рис. 3.6), за верхний уровень принята круглая форма профиля.

Зависимость кодированной величины от его действительного значения определяется по уравнениям:

$$X_1 = \frac{Z_1 - 0,194}{0,103}, \quad X_2 = \frac{Z_2 - 0}{1}, \quad X_3 = \frac{Z_3 - 0}{1}, \quad X_4 = \frac{Z_4 - 2,18}{0,2}. \quad (3.12)$$

В таблице 3.5 представлена матрица планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) 2^4 [60, 66, 97]. Количество факторов равно 4, соответственно количество экспериментов равно 16. Символ «+» в строчках таблицы означает, что в данном эксперименте фактор принимает значение, равное значению на верхнем уровне, а символ «-» в строчках таблицы означает, что фактор принимает значение, равное значению на нижнем уровне.

Таблица 3.5 – Матрица планирования эксперимента численного моделирования

№ эксперимента	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	$X_1X_2X_3$	$X_1X_2X_4$	$X_1X_3X_4$	$X_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3X_4$
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

3.6. Выводы по разделу 3

1. Выбран рациональный способ определения толщины слоя отложений на наружных поверхностях конвективных труб в котлах КВу-1,0, накопившихся за отопительный сезон эксплуатации оборудования;
2. Разработан план проведения экспериментов при помощи матрицы планирования полного многофакторного эксперимента и установлены факторы, влияющие на функцию отклика;
3. Определены характеристики численных моделей и адекватность граничных условий для прогнозирования накопления натрубных отложений в конвективных пакетах котлов КВу-1,0;
4. Составлен поэтапный план численного моделирования в зависимости от режимов и особенностей конструкции конвективных пакетов с использованием матрицы планирования эксперимента с установленными факторами, влияющими на функцию отклика;
5. На основании понимания физических процессов обтекания поперечно размещённых по отношению к газовому потоку труб с различными профилями сечения, предложена обтекаемая форма труб, менее подверженная процессам осаждения на поверхности загрязняющих частиц.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НАТРУБНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

4.1. Результаты исследований натрубных отложений

Цифровые изображения, полученные в ходе проведения натурного исследования секции конвективного пакета, отражающие размер образовавшихся отложений на конвективных трубках в нижнем ряду у котла №1 представлены в Приложении А (рис. А.1, в–е, А.2, а–г).

Результаты измерений толщины отложений в нижнем ряду труб конвективного пакета на расстоянии 250 мм от стенки котла №1 представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Журнал измерений толщины слоя отложений (мм)
для первого ряда труб у котла №1

Номер трубки в ряду	Углы, соответствующие точкам измерения							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
2	6	3	3	2	2	7	5	4,5
3	5	3	3	2	2,5	3,5	12	8,5
4	4	7	3	3	3	2	14	7,5
5	5	4	2	2	3	3	13	7
6	3,5	3,5	4	1,5	3	5	8	6
7	7	5	8	5	5	5	7	4
8	3	5	7	6	6	5	4	7
9	4	5,5	5	7	5	3	6	5
10	4	5	5	5	4	2	3	4
11	2,5	4	4	3,5	3	2	2	2

По данным Таблицы 4.1 профили отложений на трубках №8–№11 в первом ряду у котла №1 при движении дымовых газов в конвективном пакете по схеме «снизу-вверх» представлены на рис. 4.1. Кривые, отражающие профиль наружной поверхности отложений получены по точкам экспериментальных исследований.

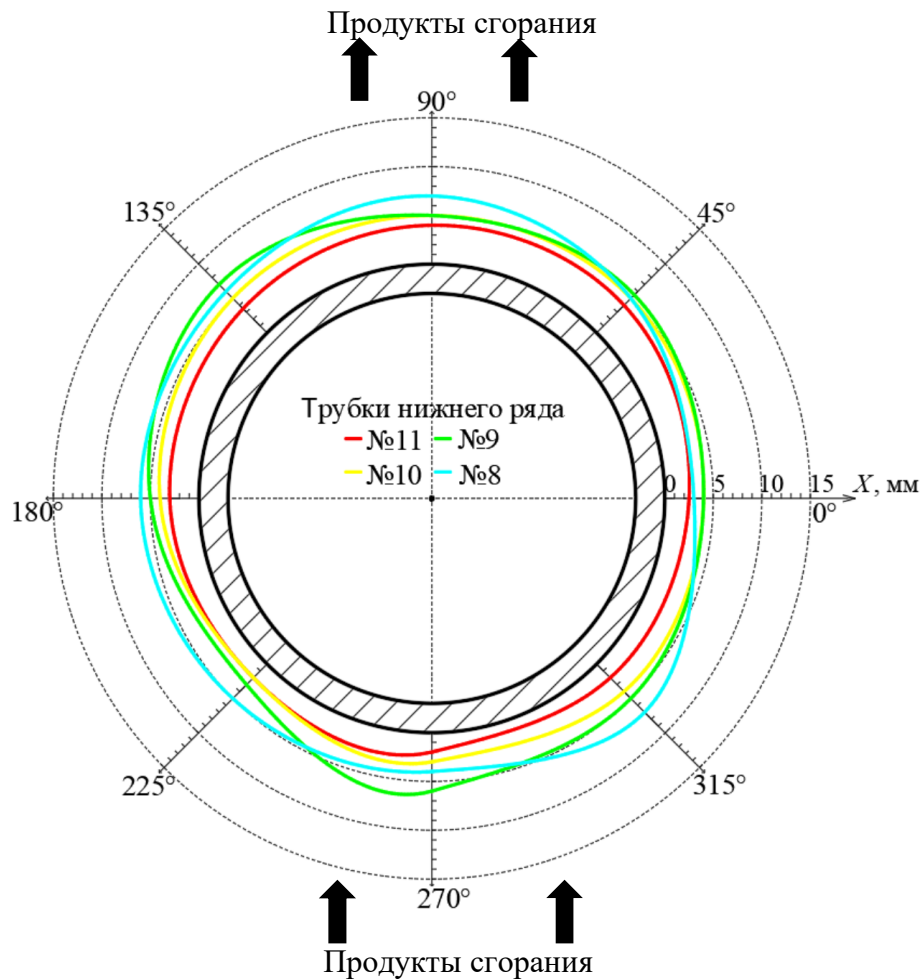


Рис. 4.1 – Профили поверхности отложений на трубках №8–№11 в нижнем ряду конвективного пакета котла №1 при движении дымовых газов по схеме «снизу-вверх»

По совмещенному графику (рис. 4.1) профилей отложений на наружной поверхности трубок №8–№11 в первом ряду трубок, где запыленный поток дымовых газов движется в направлении «снизу-вверх» видно, что значительных неровностей на поверхности отложений не наблюдается. По геометрической форме отложения напоминают деформированные окружности с впадинами, возвышениями и равнинами. Заметно, что слой золовых отложений на трубке №11 (одной из самых близкорасположенных к задней стенке котла) во всех точках измерения (среди трубок №8–№11) оказался самым тонким.

В точках измерения т.3, т.5, т.6, т.8 толщина слоя золовых отложений увеличивается от трубки №11 к трубке №8, что может свидетельствовать об увеличении толщины слоя золовых отложений в нижнем ряду конвективных

трубок от задней стенки котла к центральной области конвективного пакета, разделенного перегородкой на две части с разным направлением движения потока дымовых газов. В других точках измерения похожей тенденции не наблюдается. В точках измерения т.1, т.2, т.4, т.7 толщина отложений на трубках №8–№11 сначала увеличивается в ряду трубок от трубки №11 к трубке №9, а затем на поверхности трубки №8 уменьшается. Стоит отметить, что среди восьми точек, в которых производились измерения, в четырех точках зафиксирован рост толщины отложений от крайних трубок к трубкам расположенным рядом с разделяющей перегородкой, а в других четырех точках толщина слоя отложений сначала увеличивается от крайних трубок в ряду, а далее на трубке №8 в нижнем ряду трубок уменьшается.

Структура золовых отложений на поверхности трубки №11 очень плотная. По мере удаления трубок от задней стенки котла, на трубках №8–№9 золовые отложения более рыхлые, а на трубке №7 на расстоянии 250 мм от боковой стенки котла становятся очень рыхлыми. По мере приближения к стенке между топкой котла и конвективными пакетами становятся менее рыхлыми, однако все-таки, не достигая той же плотности, как на трубке №11.

Случаев уменьшения, а затем роста толщины отложений на трубках в зависимости от их расстояния до задней стенки котла не обнаружено. Закономерностей от расположения точек измерений на фронтальной, тыльной или боковых сторонах конвективных трубок и тенденции к изменению толщины слоя отложений на трубках не обнаружено.

Усредненная толщина (среднее арифметическое значение) слоя отложений составила для всех точек измерения 2,9 мм, 4,0 мм, 5,1 мм, 5,4 мм для трубок №11, №10, №9, №8 соответственно. Видно, что средняя толщина слоя отложений увеличивается по мере удаления трубок от задней стенки котла к центру нижнего ряда. Средняя толщина отложений золы от трубки №11 к трубке №8 проявляет снижающуюся тенденцию к росту. От трубки №11 к трубке №10 толщина слоя отложений увеличилась больше, чем у трубок №9 и

№8. Причиной такого распределения толщины является особенность конструкции котла КВу-1,0, где поток дымовых газов меняет по секциям схему направления движения с «сверху-вниз» на «снизу-вверх», проходя через поворотную камеру с разделяющей перегородкой.

Среди исследованных трубок №8–№11 максимальная толщина слоя отложений составила 7 мм, наблюдающаяся при углах измерения соответствующим точкам т.3 и т.8 у трубки №8, а также при угле соответствующим точке т.4 у трубки №9. Наименьшая толщина слоя отложений (2 мм) выявлена у трубок, где поток дымовых газов проходит по схеме с направлением движения «снизу-вверх» при углах соответствующим точкам т.7 и т.8 у трубки №11 и при угле соответствующим точке т.6 у трубок №11 и №10. Так же стоит отметить, что максимальная толщина слоя отложений наблюдается у первых трубок за разделяющей перегородкой, а минимальная толщина слоя отложений – у последних трубок в нижнем ряду.

Усредненные значения толщины отложений равны: 3,4 мм, 4,9 мм, 5,3 мм, 5,4 мм, 4,5 мм, 3,0 мм, 3,8 мм, 4,5 мм для углов, при которых проводились измерения, 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° соответственно. Видно, что на левой боковой стороне трубок средняя толщина слоя отложений на 1,1 мм (на 24,4 %) больше средней толщины слоя отложений на правой боковой стороне трубок. На фронтальной стороне поверхности трубок №8–№11 средняя толщина слоя отложений (3,0 мм, 3,8 мм, 4,5 мм) для всех трех точек измерений меньше минимального значения (4,9 мм) средней толщины отложений на тыльной стороне поверхности трубок №8–№11. Минимальное значение средней толщины отложений по углам (3,0 мм при угле соответствующим точке т.6) находится на левой фронтальной стороне поверхности трубок, а максимальное значение (5,4 мм в точке измерения т.4) на левой тыловой стороне поверхности трубок №8–№11.

Для тыловой стороны поверхности трубы разница между максимальным и минимальным значением средней толщины в точках измерения составляет

0,5 мм (9,26 %), а для фронтальной стороны поверхности аналогичная разница составляет 1,5 мм (33,3 %). Это показывает сильную неравномерность высоты слоя отложений на фронтальной стороне поверхности трубок в зависимости от угла расположения точки проведения измерений.

По данным Таблицы 4.1 профили поверхности отложений на трубках №2–№17 в первом ряду труб конвективного у пакета котла №1 при движении дымовых газов по схеме «сверху-вниз» представлены на рис. 4.2.

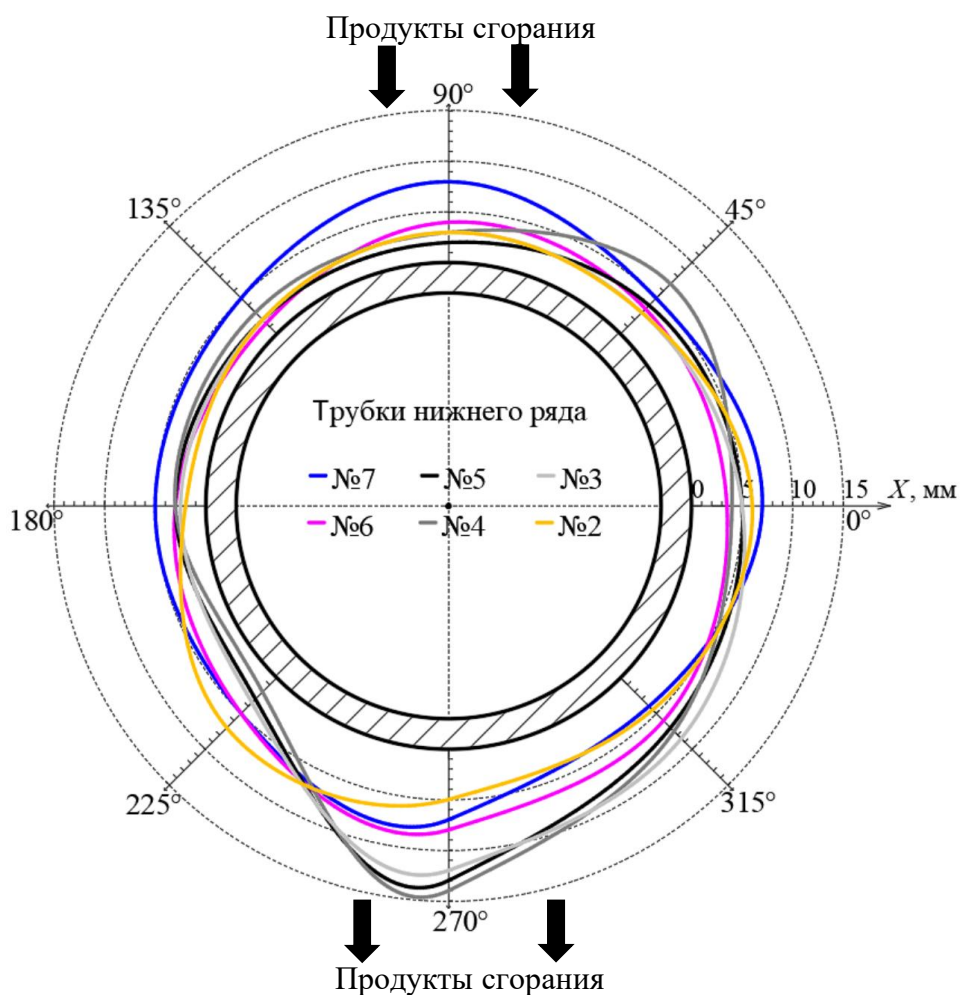


Рис. 4.2 – Профили поверхности отложений на трубках №2–№7 в первом ряду конвективного пакета у котла №1 при движении дымовых газов по схеме «сверху-вниз»

Из рис. 4.2 видно, что при направлении движения потока по схеме «сверху-вниз» распределение толщины слоя сильно отличается, и имеет явно выраженный выступ в районе точки т.7.

Заметно, что слой отложений на трубке №7 в районе точек т.3, т.4, т.5 значительно толще (от 2 до 4 мм) чем слои отложений в этих местах на других трубках. В остальных точках слой отложений на трубке №7 соответствует «средним» значениям толщины слоя отложений. При сопоставлении толщины слоев отложений между собой по разным трубкам достаточно сложно выделить трубку, где слой отложений был бы наиболее тонким.

В точках т.7, т.8 толщина слоя отложений увеличивается, следуя от трубки №7 к трубке №4 (для точки т.7) и к трубке №3 (для точки т.8), далее, уменьшается при приближении к передней стенке конвективного пакета (стенке между конвективным пакетом и топкой). В точке т.5 (правая боковая сторона поверхности трубки по отношению к направлению движения продуктов сгорания) прослеживается тенденция к уменьшению толщины слоя отложений от трубки №7 к трубке №2, то есть от разделительной перегородки до передней стенки секции конвективного пакета. В других точках подобного явления не прослеживается. В каждой точке толщина слоев отложений на разных трубках бессистемно то уменьшается, то увеличивается.

Согласно статистическому анализу более толстые слои отложений располагаются на тыльной стороне поверхности трубок. Осредненная толщина слоя отложений по трубкам №7, №6, №5, №4, №3, №2 составила 6,2 мм; 4,3 мм; 4,9 мм; 5,4 мм; 4,9 мм; 4,1 мм соответственно. Прослеживается, что средняя толщина слоя отложений уменьшается от разделительной перегородки секции конвективного пакета с движением продуктов сгорания по схеме «сверху-вниз», а далее увеличивается по направлению к центральным трубкам нижнего ряда. Далее, на первых трубках расположенных вблизи стенки между топкой и конвективными пакетами котла снова уменьшается.

Среди исследованных трубок №2–№7 максимальная толщина слоя отложений составила 14 мм, наблюдающаяся при угле измерения соответствующим точке т.7 (тыльная сторона трубки) у трубки №4. Минимальные

значения толщины слоя отложений (1,5 мм) выявлены у трубок с направлением движения потока по схеме «сверху-вниз» зафиксировано при угле соответствующим точке т.4 (фронтальная часть трубки) у трубки №6. Стоит отметить, что тыловые зоны трубок наиболее подвержены активному росту отложений, так как являются зонами со слабой турбулентностью потока, а фронтальные зоны трубок, омываемые высокотурбулентным потоком обладают меньшей склонностью к загрязнению.

Для углов точек, 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° усредненные значения толщины отложений будут следующие: 5,1 мм; 4,3 мм; 3,8 мм; 2,1 (без учета трубки №7); 2,7 мм (без учета трубки №7); 4,1 мм (без учета трубки №7); 9,8 мм; 6,3 мм соответственно. Стоит отметить, что максимум среднего значения толщины с распределением по углам в секции конвективного пакета с направлением движения потока по схеме «сверху-вниз» оказался выше максимума среднего значения среди трубок второй секции конвективного пакета на 44,9 % (4,4 мм). На правой боковой стороне трубок средняя толщина слоя отложений на 2,4 мм (на 47 %) превышает среднюю толщину слоя отложений на левой стороне трубок. Для фронтальной поверхности трубок №2–№7 с правой стороны прослеживается рост толщины слоя отложений до 2,1 мм, а с левой стороны рост толщины слоя до 4,3 мм. В центральной части тыловой поверхности трубки в точке т.7 толщина слоя отложений максимальна, а толщина слоя на левой и правой сторонах тыловой поверхности трубок меньше чем в центре. Усредненная толщина загрязнений на фронтальной стороне трубок значительно меньше чем на тыльной стороне трубок. Минимальное значение усредненной толщины отложений (2,1 мм при угле соответствующим точке т.4) находится с левой стороны фронтальной поверхности трубок, а максимальное (9,8 мм в точке т.7) по центру тыльной стороны поверхности трубок №2–№7.

Для тыльной стороны поверхности трубок разница между максимальными и минимальными значениями усредненной толщины слоя в

точках измерения составила 5,7 мм, а для фронтальной поверхности аналогичная разница составила 2,2 мм, что отражает более высокую неравномерность распределения слоев отложений на тыльной стороне.

Изображения образовавшихся золых отложений на конвективных трубках нижнего ряда у котла №2 показаны в Приложении А (рис. А.1, е); рис. А.2, а-д). Результаты исследования толщины слоя отложений нижнего ряда труб конвективного пакета на расстоянии 250 мм от стенки конвективной части у котла №2 представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Журнал измерений толщины слоя отложений (мм)
для нижнего ряда труб у котла №2

Номер трубки в ряду	Углы, соответствующие точкам измерения							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
2	6	3	3	3	2,5	4,5	5	4,5
3	5	8	3,5	3,5	2,5	4	15	5
4	6	6	4	2	2,5	4,5	12	4
5	8	8	6	3	4	4,5	12	3
6	4	4	8	3	5	10,5	14	8
7	4	5	7	10	7	5	8	2,5
8	5	6	7	13	14	5	4	7
9	4	5	8	14	10	3,5	4	1,5
10	4	5	6	13	3	1	4	4
11	2,5	2,5	4	4	3	1	3	2

По данным Таблицы 4.2 профили поверхности отложений на трубках №8–№11 в нижнем ряду у котла №2 при движении дымовых газов в секции конвективного пакета по схеме движения «снизу-вверх» представлены на рис. 4.3.

Из рис. 4.3 видно, что в секции конвективном пакета у котла №2 с направлением движения потока по схеме «снизу-вверх» характер распределения толщины отложений другой. Имеется явно выраженное утолщение слоя в районе точек т.3–т.6. Это утолщение выявлено на трубках №8, №9 и частично

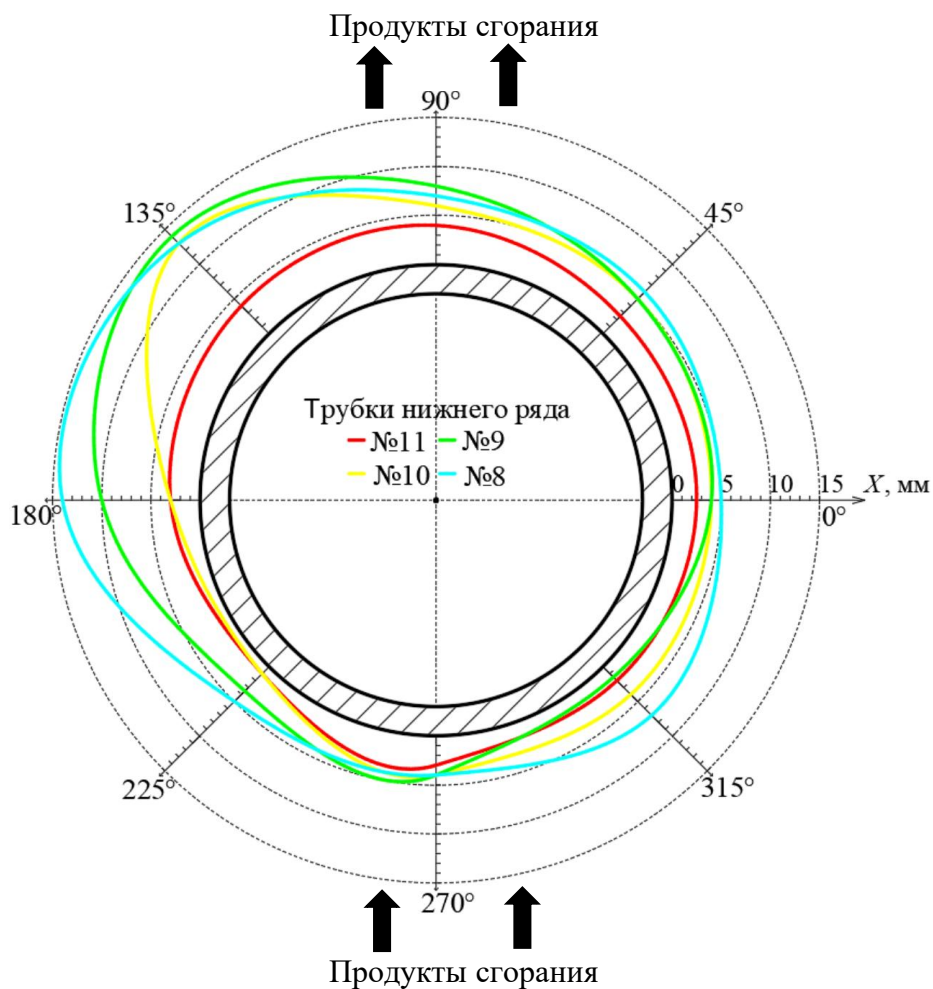


Рис. 4.3 – Профили поверхности отложений на трубках №8–№11 в нижнем ряду конвективного пакета у котла №2 при движении дымовых газов по схеме «снизу-вверх»

№10 в точке т.4. С другой стороны поверхности (противоположной стороне с утолщением) для всех трубок толщина слоя распределена равномерно, с едва заметным утолщением слоя на трубке №8 в точке т.8 (наиболее близкой стороны поверхности, обращенной к выходному окну перегородки, разделяющей секции конвективного пакета). В отличие от характеристик слоя загрязнений на трубках конвективных пакетов у котла №1, на конвективных трубках котла №2 наблюдается большее количество отложений с толщиной более 12 мм. Заметно, что слой отложений на трубке № 11 (самой близкорасположенной к задней стенке котла) в большинстве точек (среди трубок №8–№11) оказался одним из самых тонких.

В точке т.7 толщина слоя отложений на трубках №8–№11 – 3-4 мм. В точках т.1–т.4 толщина слоя отложений увеличивается от трубки №11 к трубке №8, что свидетельствует об увеличении толщины слоя в нижнем ряду от задней стенки котла к центральной части конвективного пакета, разделенного перегородкой на две секции с разной схемой направления движения потока. В точках т.5 и т.6 толщина отложений на трубках №10–№11 не меняется, далее по длине конвективной секции в сторону разделительной перегородки наблюдается рост толщины слоя. В точке т.8 толщина отложений на трубках №8–№11 сначала увеличивается от трубки №11 к трубке №10, затем принимает минимальное значение (1,5 мм), потом снова растет и на трубке №8 рядом с разделительной перегородкой принимает максимальное значение 7 мм. В точках т.4, т.5 (левые боковая и тыльная сторона поверхности трубок) имеется сильный скачок толщины слоя, например сравнивая точку т.4 на трубках №10 и №9 видно, что на трубке №11 толщина слоя составила 3 мм, а на соседней с ней трубке при том же угле толщина слоя уже 13 мм.

Аналогично случаю с котлом №1, структура отложений на трубках №6–№8 для котла №2 по обе стороны разделительной перегородки имеет более рыхлую структуру, более склонную к разрушениям, чем отложения на трубках, удаленных от разделительной межсекционной перегородки.

Для трубок №11, №10, №9, №8, №7 (без точек замеров т.1–т.3, т.7–т.8) усредненная величина толщины отложений для всех точек составила: 2,8 мм; 5,0 мм; 6,3 мм; 7,6 мм; 7,3 мм соответственно. Выявлено, что усредненная толщина слоя отложений увеличивается по мере удаления трубок от задней стенки котла к центру нижнего ряда труб конвективного пакета. Причиной такого распределения толщины может являться особенность конструкции котла Кву-1,0, позволяющей потоку дымовых газов, проходящему через окно в разделительной перегородке менять направление движения со схемы «сверху-вниз» на схему «снизу-вверх». Усредненные значения толщины отложений

для секции конвективных пакетов с направлением движения потока «снизу-вверх» больше у ряда трубок котла №2.

Среди обследованных трубок №8–№11 максимальная толщина слоя отложений составила 14 мм, что на 7 мм больше в сравнении с аналогичными трубками №8–№11 у котла №1. Максимальная толщина слоя отложений наблюдается при углах, соответствующих точке т.5 у трубки №8 и точки т.4 у трубки №9 (левые боковая и тыльная стороны поверхности трубок). Минимальная толщина слоя отложений (1 мм) выявлена у трубок, где поток дымовых газов проходит с направлением движения по схеме «снизу-вверх» при угле соответствующей точке т.6 (левая часть фронтальной поверхности трубки) у трубок №10–№11. Минимальная толщина слоя отложений среди трубок №8–№11 у котла №2 на 1 мм меньше минимального значения в сравнении с аналогичными трубками №8–№11 у котла №1. Необходимо отметить, что максимальная толщина слоя наблюдается у первых трубок возле разделительной перегородки, а минимальная толщина слоя – у последних трубок в нижнем ряду. Для углов, где проводились измерения, 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° усредненная толщина равна 3,9 мм; 4,6 мм; 6,3 мм; 10,8 мм; 7,4 мм; 3,1 мм; 3,8 мм; 3,6 мм соответственно. Выявлено, что на левой боковой стороне трубок усредненная толщина слоя в сравнении с усредненной толщиной слоя на правой боковой стороне трубок больше на 3,5 мм (на 47,3 %). Для фронтальной поверхности трубок №8–№11, усредненные значения толщины слоя отложений (3,1 мм; 3,8 мм; 3,6 мм) для всех трех точек измерений меньше значений усредненной толщины отложений на тыльной стороне поверхности трубок №8–№11. На тыльной стороне поверхности конвективных трубок, усредненная толщина слоя увеличивается от точки т.2 к точке т.4 (от правой стороны к левой стороне тыльной поверхности трубки), а на фронтальной поверхности такой тенденции не наблюдается – толщина слоя распределена неравномерно по всем трем точкам проведения измерений. Максимальное значение зафиксировано по центру фронтальной поверхности, минимальное на

левой стороне фронтальной поверхности трубок. Минимальное значение усредненной по углам толщины слоя отложений (3,1 мм при угле, соответствующим точке т.6) находится на левой фронтальной стороне поверхности трубок, а максимальное значение (10,8 мм в точке т.4) на левой стороне тыльной поверхности трубок №8–№11. Для котла №1 во второй секции конвективного пакета минимальные и максимальные величины толщины отложений, усредненные по углам так же выявлены у точек т.6 и т.4 соответственно.

Для тыльной поверхности разница между максимальными и минимальными значениями толщины отложений, усредненных по углам в точках измерения составляет 6,2 мм (57,4 %), а для фронтальной поверхности аналогичная разница составляет 0,7 мм (18,4 %), что отражает наличие более сильной неравномерности слоя отложений на тыльной стороне поверхности трубок.

По данным Таблицы 4.2 профили поверхности отложений на трубках №2–№7 в нижнем ряду у котла №2 при движении дымовых газов в секции конвективного пакета по схеме «сверху-вниз» представлены на рис. 4.4.

Из рис. 4.4 видно, что присутствует несколько областей, где наблюдаются рост толщины слоев отложений на исследованных трубках №2–№7. Среди них следует выделить: рост толщины слоев на трубках №3–№6 в районе точки т.7 и рост толщины слоев в районе точки т.4 на трубке №7. Сложно выделить среди трубок №2–№7 слой отложений с минимальной толщиной слоя.

В точке т.5 толщина слоя отложений уменьшается от трубки №7 к трубке №4, устремляясь далее постоянной величиной. В других точках похожей тенденции не наблюдается – толщина слоев то увеличивается, то снижается.

Для трубок №7 (без точек измерения т.4–т.6), №6, №5, №4, №3, №2 усредненная по номеру трубок толщина слоя для всех точек измерений составила 5,3 мм; 7,1 мм; 6,1 мм; 5,1 мм; 5,8 мм; 3,9 мм соответственно. Выявлено, что усредненная толщина слоя снижается от трубки №6 до трубки №4 нижнего ряда секции конвективного пакета, причем уменьшение толщины происходит на 1 мм при сравнении с каждой парой трубок.

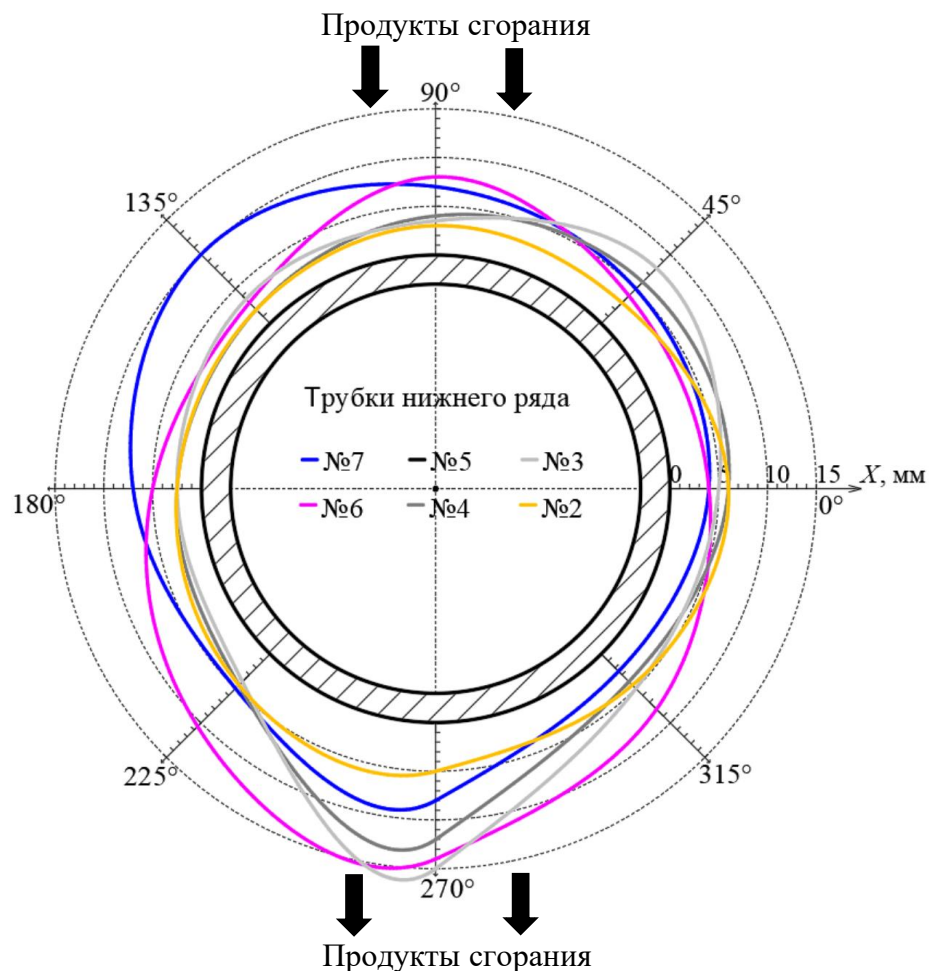


Рис. 4.4 – Профили поверхности отложений на трубках №2–№7 в нижнем ряду секции конвективного пакета у котла №2 при движении дымовых газов по схеме «сверху-вниз»

Среди исследованных трубок №2–№7 максимальная толщина слоя отложений составила 15 мм, наблюдающаяся при угле соответствующим точке т.7 (центр тыльной поверхности трубки) у трубки №3, что является максимальным значением для всего нижнего ряда секций конвективных пакетов у котла №2 и на 1 мм больше максимального значения выявленного в нижнем ряду конвективных пакетов у котла №1. Минимальная толщина слоя отложений (2 мм) выявлена у трубок №2–№7, где проходит поток дымовых газов с направлением движения по схеме «сверху-вниз» при угле соответствующим точке т.4 у трубки №4, что на 1 мм больше минимального значения среди трубок второй секции конвективного пакета у котла №2 и на 0,5 мм больше минимального значения среди всех конвективных трубок нижнего ряда у котла №1.

Максимальные и минимальные толщины обнаружены у трубок расположенных ближе к центру нижнего ряда секции конвективного пакета, в отличии от другой секции конвективного пакета, где подобные значения обнаружены у трубок расположенных вблизи разделительной межсекционной перегородки и стенок котла.

Для углов, где проводились измерения, 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° усредненные значения толщин равны: 5,5 мм; 5,7 мм; 5,3 мм; 2,9 мм; 3,3 мм; 5,6 мм; 11,0 мм; 4,5 мм соответственно. Выявлено, что на левой боковой стороне трубок усредненное значение толщины слоя меньше на 2,2 мм по сравнению с усредненной толщиной слоя на правой боковой стороне поверхности трубок. Для фронтальной поверхности трубок №2–№7, минимальные и максимальные осредненные значения толщины слоя отложений (2,9 мм; 5,3 мм; 5,7 мм) для всех трех точек измерений меньше минимального и максимального значений усредненной толщины отложений на тыльной поверхности трубок №2–№7. На фронтальной поверхности трубок с увеличением угла соответствующего точке измерения усредненная толщина слоя отложений уменьшается, что объясняется диагональным расположением входного отверстия для запылённого потока продуктов сгорания относительно трубок со стороны углов, соответствующих точкам т.2-т.3. Для тыльной стороны трубок такой тенденции не прослеживается. Минимальное значение усредненной толщины отложений по углам (2,9 мм при угле, соответствующему точке т.4) находится на левой фронтальной стороне поверхности трубок, а максимальное значение (11 мм в точке т.7) в центре тыльной стороны поверхности трубок №2–№7.

Для фронтальной поверхности разница между максимальными и минимальными значениями усредненной толщины по углам соответствующим точкам измерения составляет 2,8 мм, а для тыльной поверхности аналогичная разница составляет 6,5 мм.

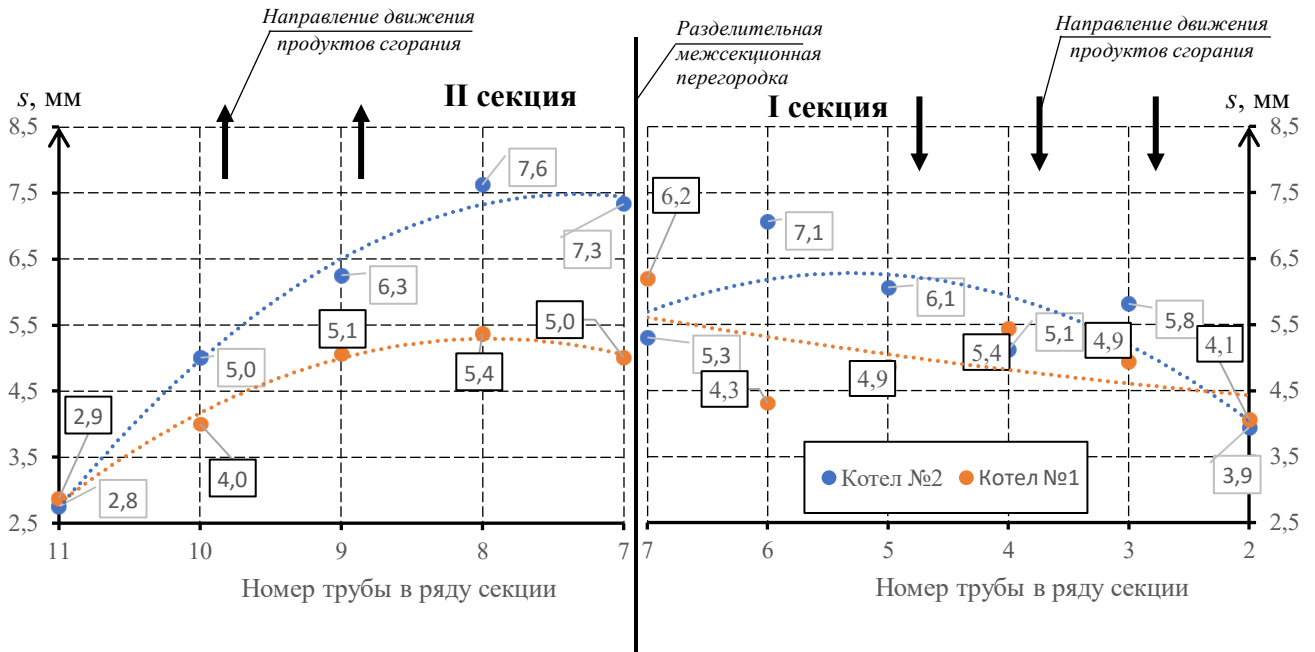


Рисунок 4.5 – Зависимости усредненных значений толщины отложений на конвективных трубах по длине нижнего ряда труб для котлов №1 и №2

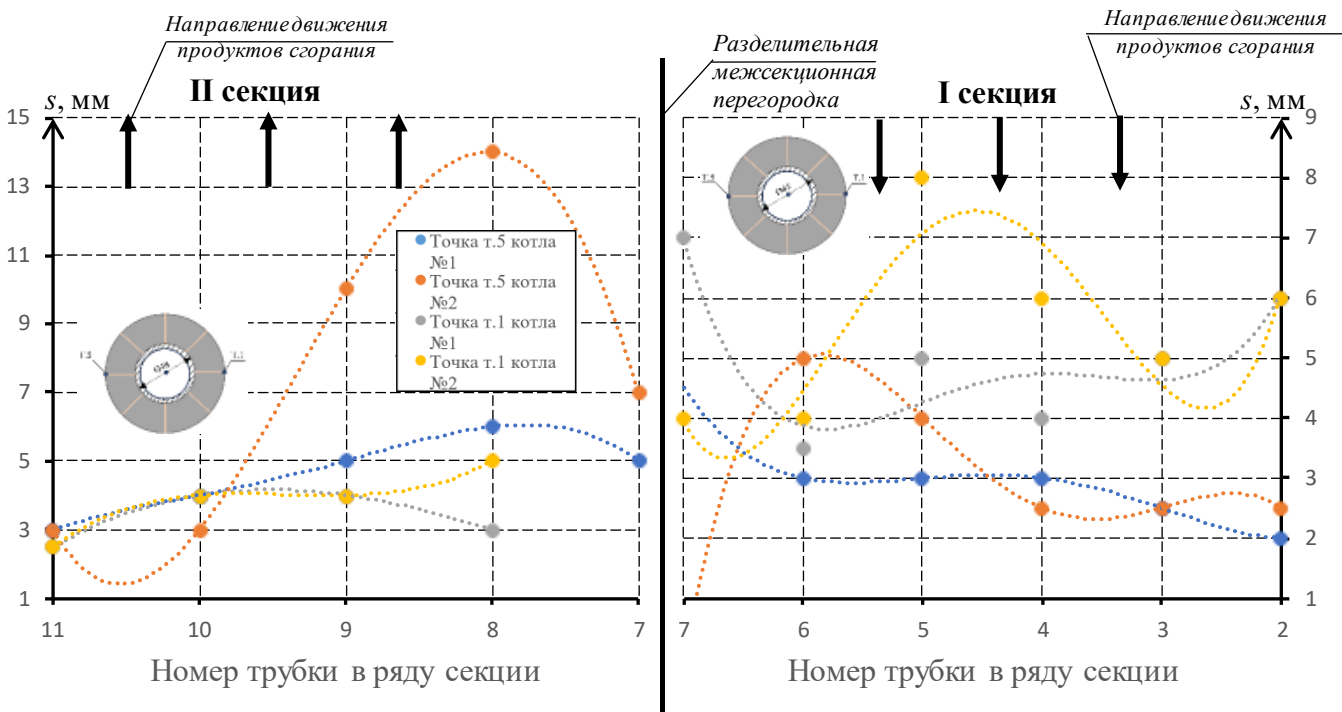


Рис. 4.6 – Зависимости толщины отложений от ширины секций конвективного пакета для точек т.1 и т.5

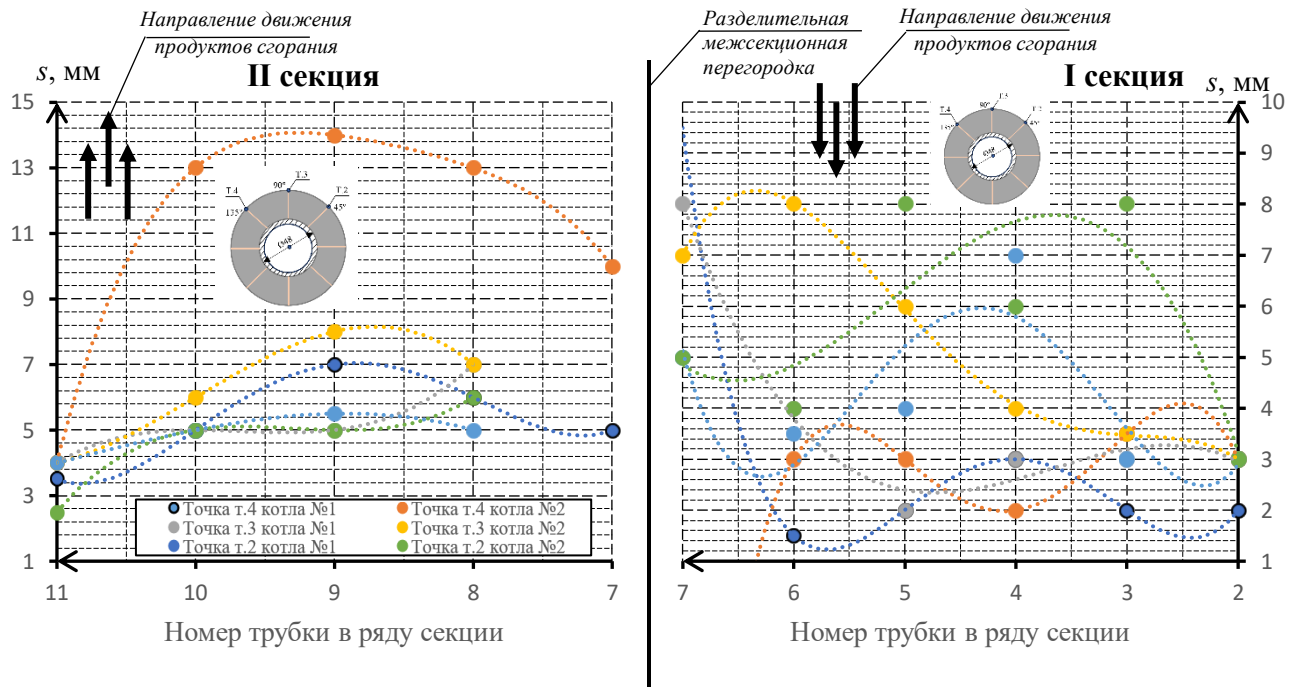


Рис. 4.7 – Зависимости толщины отложений от ширины секций конвективного пакета для точек т.2, т.3, т.4

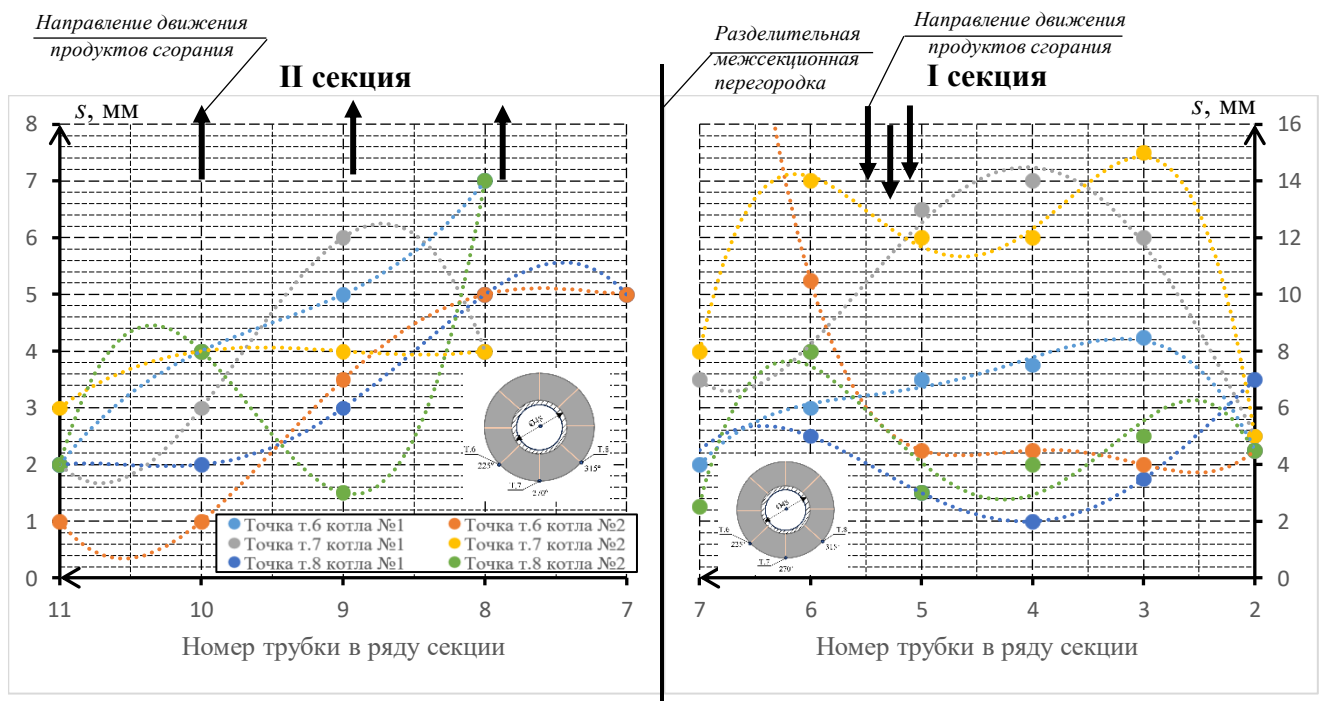


Рис. 4.8 – Зависимости толщины отложений от ширины секций конвективного пакета для точек т.6, т.7, т.8

После обработки результатов исследований толщины отложений для нижнего ряда труб конвективных пакетов у котлов №1 и №2 построены зави-

симости (рис. 4.5–4.8) [44]. Ко второй секции конвективных пакетов, омываемых потоком по схеме «снизу-вверх» отнесены толщины отложений на трубке №7 в точках т.4–т.6. К первой секции конвективного пакета, омываемых потоком по схеме «сверху-вниз» в остальных точках измерения отнесены толщины отложений на трубе №7.

Изображения образовавшихся отложений на конвективных трубках №12 в рядах №2–№7 для котла №2 показаны в Приложении А (рис. А.2, д–е, рис. А.3, а–е, рис. А.4, а–е, Рис. А.5, а). Результаты измерений толщины отложений на крайних трубках (трубках №12) рядов труб секций конвективного пакета для котла №2 на расстоянии 300 мм от правого стояка представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Журнал измерений толщины слоя отложений (мм)
для трубок №12 на расстоянии 300 мм для котла №2

Номер ряда трубок	Углы соответствующие точкам измерения							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
2	2	4	13	10	16	1	4	2
3	2	9	22	16	14	3	2	2
4	3	7	14	10	10	3	2,5	3
5	6	8,5	11	13	13	3	2,5	3
6	5	5	26	10	10	3	3	5
7	5	10	18,5	13	13	3	2	4

По данным Таблицы 4.3 профили отложений на трубках №12 на расстоянии 300 мм от стояка в рядах №2–№7 для котла №2 при движении дымовых газов в секции конвективного пакета по схеме «снизу-вверх» представлены на рис. 4.9.

Из рис. 4.9 видно, что в точках т.1–т.2, т.6–т.8 и между ними слои отложений имеют сравнительно небольшую толщину. Между т.2 и т.6 слои отложений на трубках в рядах №2–№7 имеют сильное утолщение с двумя образовавшимися «вершинами»: в точке т.3, где выделяется слой на трубке в ряду №6 и в точке т.5, где выделяются уже несколько таких слоев.

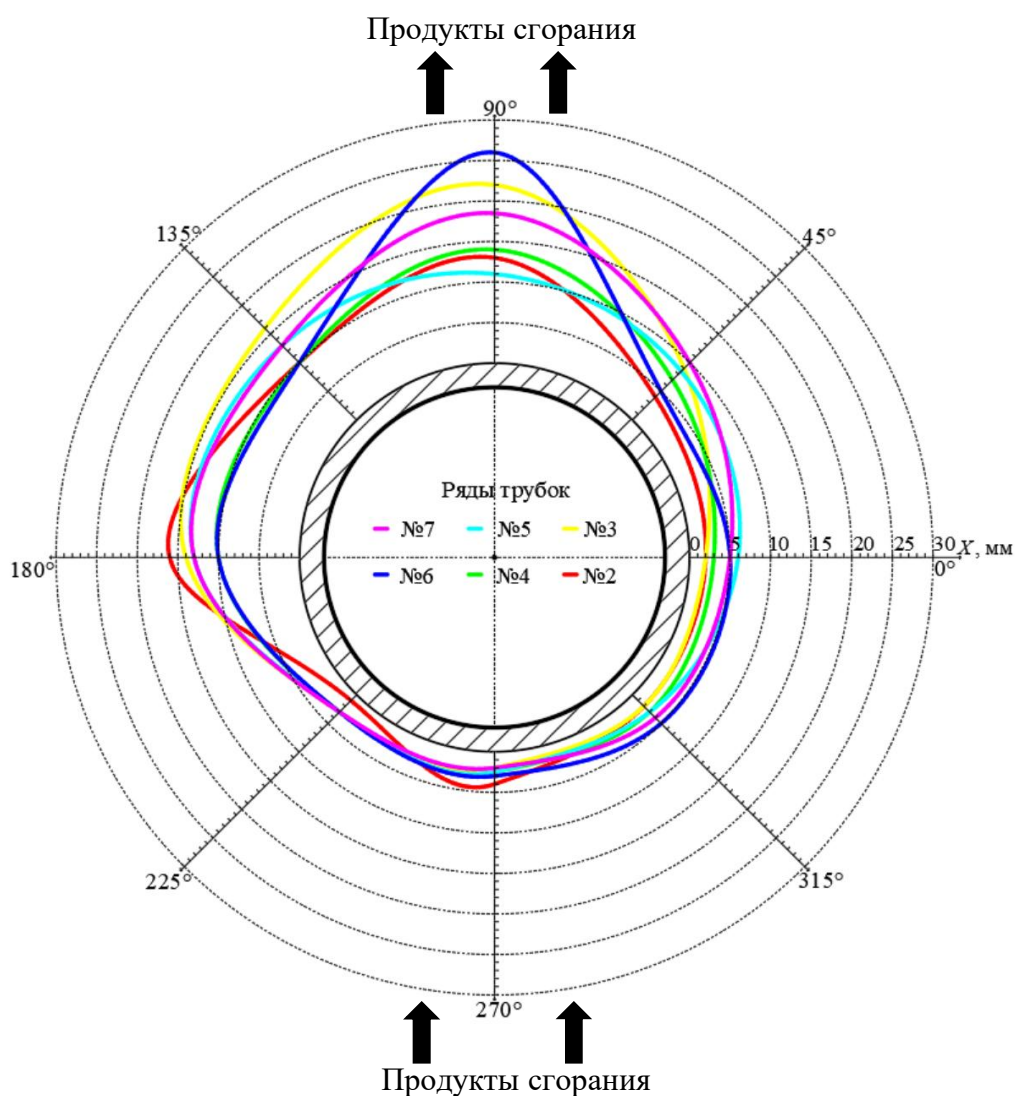


Рис. 4.9 – Профили поверхности отложений на трубках №12 на расстоянии 300 мм от стояка в рядах №2–№7 для котла №2

В точке т.6 (левая боковая сторона фронтальной поверхности трубок) толщина слоя отложений увеличивается от трубки ряда №2 с 1 мм до 3 мм и далее на всех исследованных трубках рядов №3–№7 остается постоянной (3 мм). В других точках подобного распределения не прослеживается. Сравнивая толщину слоев с соседними трубками при одном и том же угле соответствующим точке замера, наблюдается как увеличение, так и уменьшение толщины слоя отложений. В точках т.1, т.7, т.8 толщина слоев отложений изменяется в диапазоне 2,5–6 мм, а в точках т.2–т.6 в диапазоне 4–26 мм.

Структура отложений на поверхности трубок в точках т.2–т.4 рыхлая и сыпучая, подвержена разрушению даже при небольшом воздействии.

Для рядов №2, №3, №4, №5, №6, №7 усредненная толщина слоя отложений для всех точек измерения по трубкам составила: 6,5 мм; 8,8 мм; 6,6 мм; 7,5 мм; 8,4 мм; 8,6 мм соответственно. По высоте секции конвективного пакета усредненная толщина слоя отложений не имеет выраженной тенденции к уменьшению или увеличению. Отмечается лишь увеличение усреднённой толщины слоя отложений в ряду труб начиная с ряда № 4, причем с увеличением номера ряда рост толщины слоя при сравнении пар трубок замедляется.

Среди исследованных рядов №2–№7 максимальная толщина слоя отложений (26 мм) выявлена на расстоянии 300 мм от правого стояка, наблюдающаяся при угле, соответствующем точке т.3 у трубки ряда №6. У нижнего ряда труб максимальная толщина слоя составила 15 мм, что на 9 мм меньше, чем у ряда №6, а толщина слоя на трубках, расположенных рядом с задней стенкой, не превышает 4 мм. Минимальная толщина слоя отложений в 1 мм зафиксирована при угле, соответствующем точке т.6 у трубки ряда №2, что объясняется расположением трубки рядом с задней стенкой котла в труднодоступной для потока зоне. Выявлено, что области поверхности трубок с максимальной толщиной слоя отложений располагаются с тыльной стороны трубок, по диагонали к направлению движения запыленного потока.

Для углов 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° усредненные значения толщины равны: 3,8 мм; 7,3 мм; 17,4 мм; 12,0 мм; 12,7 мм; 2,7 мм; 2,7 мм; 3,2 мм соответственно. Выявлено, что на левой боковой стороне трубки усредненная толщина слоя отложений больше на 8,9 мм (на 70 %) в сравнении с усредненной толщиной слоя на правой боковой стороне трубок. Для фронтальной поверхности трубок рядов №2–№7, средняя толщина слоя отложений (2,7 мм; 2,7 мм; 3,2 мм) для трех точек измерений соответственно меньше минимального значения 7,3 мм – усредненной толщины слоя отложений для тыльной поверхности трубок. Минимальная толщина отложений осреднённая по углам

(2,7 мм при углах, соответствующих точкам т.6, т.7) находится с левой стороны и в центре фронтальной поверхности трубок, а максимальная толщина (17,4 мм в точке т.3) в центре тыльной стороны поверхности трубок рядов №2–№7.

Для тыльной стороны поверхности трубок разница между максимальной и минимальной толщиной, усредненной по углам в точках измерения составляет 10,1 мм, а для фронтальной поверхности аналогичная разница составляет 0,5 мм, что выявляет более высокую неравномерность слоя отложений на тыльной поверхности трубок.

Результаты измерения толщины слоя отложений для крайних трубок (трубки №12) конвективного пакета на расстоянии 600 мм от правого стояка для котла №2 представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Журнал измерений толщины слоя отложений (мм) для трубок №12 на расстоянии 600 мм от стояка для котла №2

Номер трубки в ряду	Углы соответствующие точкам измерения							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
2	2	5	12	4	14	3	4	2
3	2,5	15	17	13	10	3	2	2
4	2	4	13	6	7	3	2	2
5	2	7	13	13	14	3	2,5	3
6	3	7	23	10	10	3	3	5
7	4	11	30	13	13	5	3	5

По данным Таблицы 4.4 профили золовых отложений на трубках №12 на расстоянии 600 мм от стояка в рядах №2–№7 для котла №2 при движении дымовых газов в секции конвективного пакета по схеме «снизу-вверх» представлены на рис. 4.10.

Из рис. 4.10 видно, что в точках т.1–т.2, т.6–т.8 и между ними слои отложений также имеют сравнительно небольшую толщину. Между т.2 и т.6 слои отложений на трубках в рядах №2–№7 имеют сильное утолщение с двумя

образовавшимися «вершинами»: в точке т.3, где особо выделяются слои на трубках в рядах №3, №6–7 и в точке т.5, где выделяются уже почти все слои.

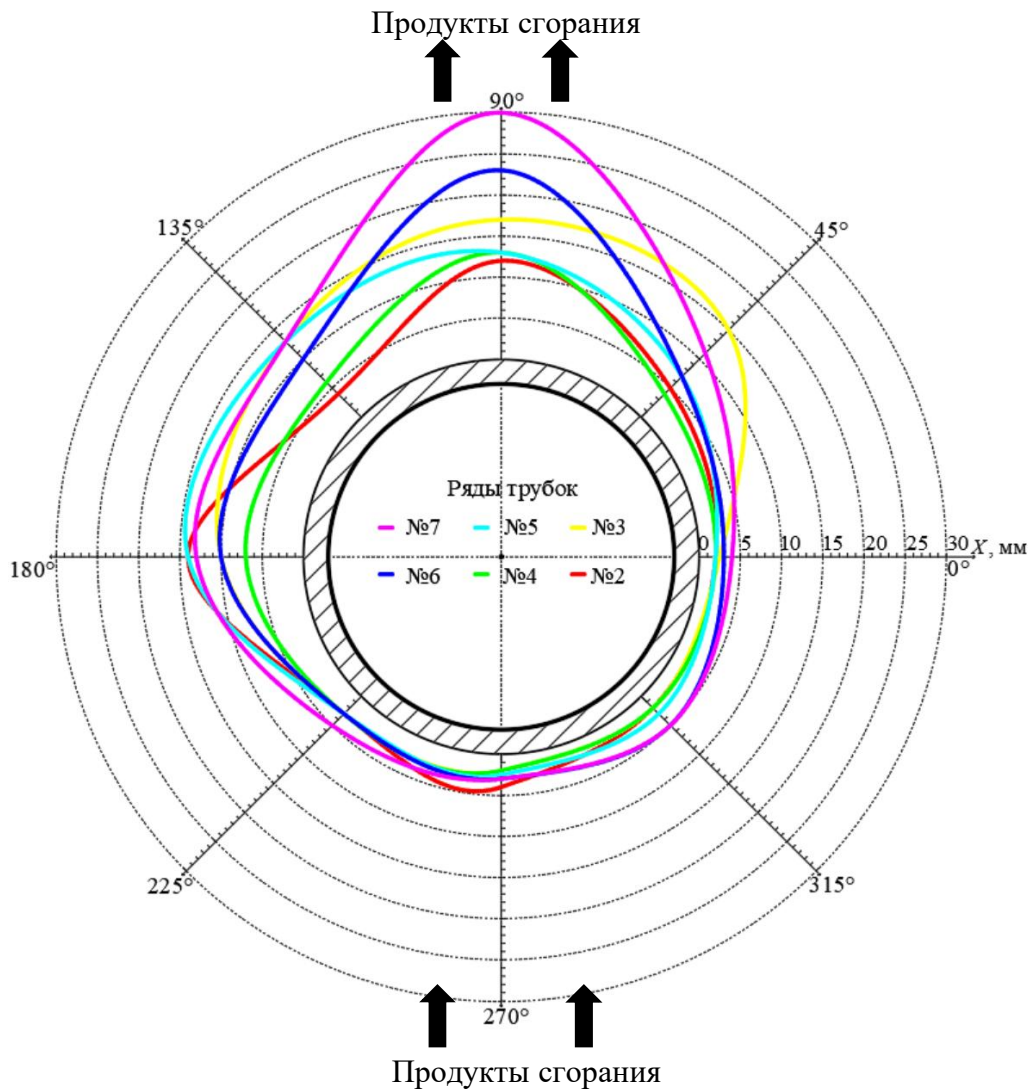


Рис. 4.10 – Профили поверхности отложений на трубках №12 на расстоянии 600 мм от стояка в рядах №2–№7 для котла №2

В точке т.8 толщина слоя отложений увеличивается от ряда №2 к ряду №7, что объясняется снижением активности турбулентных вихрей при приближении потока к выходу из конвективных пакетов котла. В точке т.6 (левая боковая сторона фронтальной поверхности трубок) толщина слоя отложений не изменяется и равна 3 мм для рядов труб с №2 по №6, увеличиваясь до 5 мм

только на трубках ряда №7. В других точках похожего явления не наблюдается. Сравнивая толщину слоев с соседними трубками, наблюдается как повышение, так и уменьшение толщины слоя отложений. В точках т.1, т.6, т.7, т.8 (нижняя половина окружности) толщина слоев варьируется в диапазоне 2–4 мм, а в точках т.2–т.5 (верхняя половина окружности) толщина отложений значительно увеличивается и изменяется в диапазоне 4–30 мм.

Структура отложений на поверхности трубок в точках т.2–т.4 рыхлая и сыпучая, подвержена разрушению даже при небольшом воздействии.

Для трубок рядов №2, №3, №4, №5, №6, №7 усредненная по ряду толщина слоя отложений составила для всех точек измерения 5,8 мм; 8,1 мм; 4,9 мм; 7,2 мм; 8,0 мм; 10,5 мм соответственно. По высоте секции конвективного пакета усредненная толщина слоя отложений не имеет выраженной тенденции к уменьшению или увеличению. Отмечается лишь увеличение усреднённой толщины слоя отложений в ряду труб начиная с ряда № 4.

Среди обследованных рядов №2–№7 максимальная толщина слоя отложений 30 мм выявлена на расстоянии 600 мм от правого стояка наблюдающаяся при угле соответствующем точке т.3 у трубки ряда №7, что на 4 мм больше, чем максимальное значение среди слоев на расстоянии 300 мм от стояка. Минимальная толщина слоя в 2 мм зафиксирована при углах, соответствующих точкам т.7, т.8, т.1 у трубок нескольких рядов.

Для углов 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315° усредненные по углам значения толщины слоя отложений равны: 2,6; 8,2 мм; 18,0 мм; 9,8 мм; 11,3 мм; 3,3 мм; 2,8 мм; 3,2 мм соответственно. Выявлено, что на левой боковой стороне поверхности трубок усредненная толщина слоя отложений больше на 8,7 мм в сравнении с усредненной толщиной слоя на правой боковой стороне поверхности трубок. Разница усредненной толщины между боковыми сторонами поверхности трубок на расстоянии 600 мм от стояка меньше на 0,2 мм чем при измерении на расстоянии 300 мм от стояка. Для фронтальной стороны поверхности трубок рядов №2–№7, средняя толщина слоя отложений (3,3 мм;

2,8 мм; 3,2 мм) для всех трех точек измерений меньше минимального значения (8,2 мм) усредненной толщины отложений на тыльной поверхности трубок рядов №2–№7, что соответствует данным полученным при измерении толщины слоя на расстоянии 300 мм от стояка. Минимальная усредненная по углам величина толщины отложений (2,6 мм при угле, соответствующем точке т.1) находится на правой боковой стороне поверхности трубок, а максимальная величина (18 мм в точке т.3) в центре тыльной стороны поверхности трубок рядов №2–№7.

Для тыльной стороны поверхности трубок разница между максимальным и минимальным значением усредненной по углам толщины в точках измерения составляет 9,8 мм, а для фронтальной стороны поверхности аналогичная разница составляет 0,5 мм, что демонстрирует более высокую неравномерность слоя отложений на тыльной стороне поверхности трубок.

Результаты измерений толщины слоя отложений для крайних трубок (трубки №12) конвективного пакета на расстоянии 900 мм от стояка для котла №2 представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Журнал измерений толщины слоя отложений (мм)
для трубок №12 на расстоянии 900 мм у котла №2

Номер трубки в ряду	Углы соответствующие точкам измерения							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
2	3	8	16	5	15	2	4	2
3	2	15	16	9	6	2	1	2
4	3	8	15	6	6	5	2	3
5	2,5	7	15	15	10	5	3	3
6	2	10	23	20	14	3,5	3	5
7	1	10	29	15	13	4	3	0

По данным Таблицы 4.5 профили отложений на трубках №12 на расстоянии 900 мм от стояка в рядах №2–№7 для котла №2 при движении дымовых газов в секции конвективного пакета по схеме «снизу-вверх» представлены на рис. 4.11.

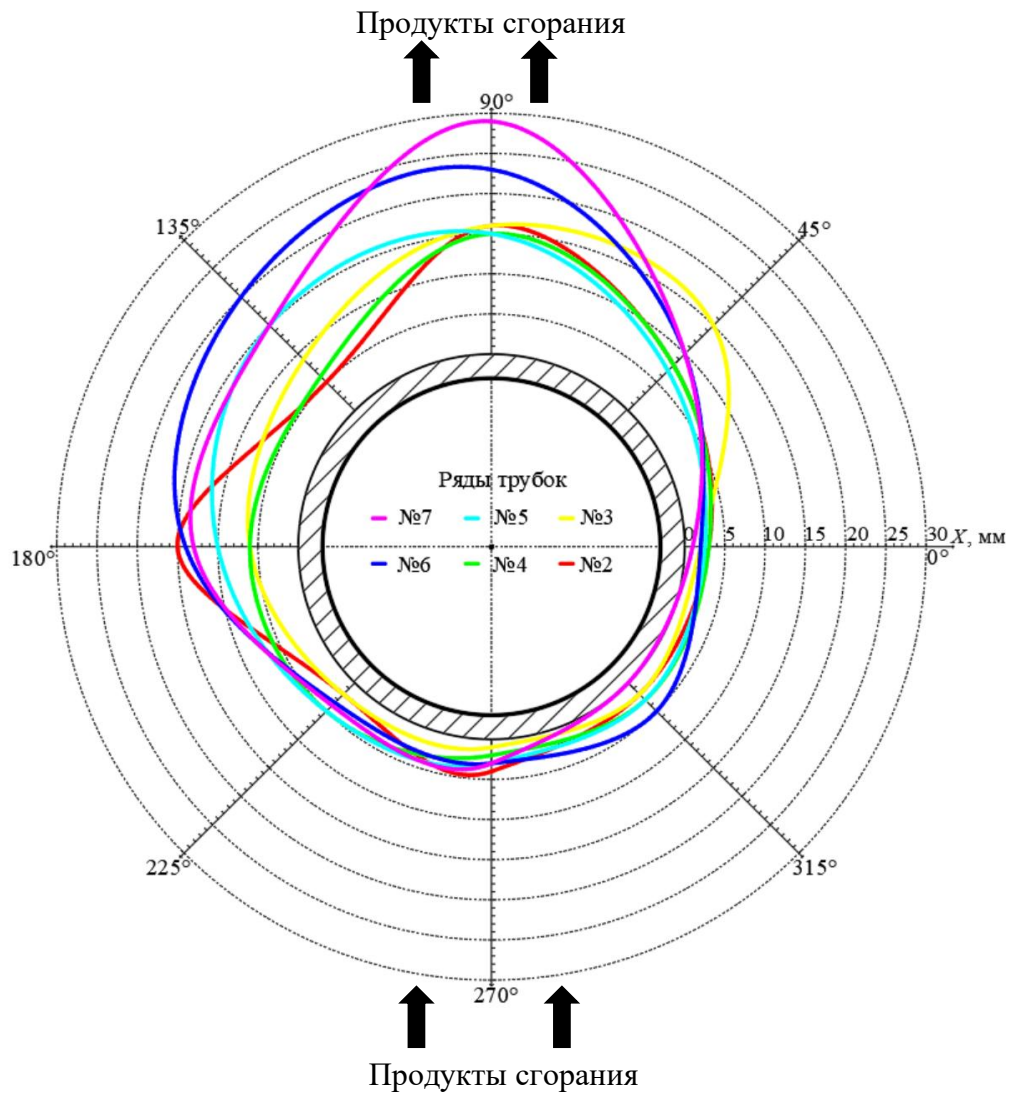


Рис. 4.11 – Профили поверхности отложений на трубках №12 на расстоянии 900 мм от стояка в рядах №2–№7 для котла №2

Из рис. 4.11 видно, что в точках т.1–т.2, т.6–т.8 и между ними слои отложений имеют сравнительно небольшую толщину. Между т.2 и т.6 слои отложений на трубках в рядах №2–№7 имеют сильное утолщение с двумя образовавшимися «вершинами»: в точке т.3, где особо выделяются слои на трубках рядов №6–7 и в точке т.5, где особо выделяется слой на трубке ряда №2. Также заметно некоторое увеличение толщины слоя на трубке принадлежащей ряду №6 в промежутке от точек т.2 до т.6.

При сравнении толщины слоев на соседних расположенных трубках наблюдается как увеличение, так и уменьшение толщины слоя отложений. В

точках т.1, т.6, т.7, т.8 (нижняя половина окружности) толщина слоев варьируется в диапазоне 0–4 мм, а в точках т.2–т.5 (верхняя половина окружности) толщина слоев отложений значительно больше и изменяется в диапазоне 2–29 мм.

Структура золотых отложений на поверхности трубок в точках т.2–т.4 рыхлая и сыпучая, подвержена разрушению даже при небольшом воздействии.

Для трубок рядов №2, №3, №4, №5, №6, №7 усредненная по ряду толщина слоя отложений составила для всех точек измерения: 6,9 мм; 6,6 мм; 6,0 мм; 7,6 мм; 10,1 мм; 9,4 мм соответственно. В отличие от толщины, измеренной на расстоянии 300 и 600 мм от стояка по высоте секции конвективного пакета осредненная толщина слоя отложений имеет тенденцию к снижению от ряда № 2 до ряда №4.

Среди обследованных рядов №2–№7 максимальная толщина слоя отложений (29 мм) выявлена на расстоянии 900 мм от стояка, наблюдающаяся при угле соответствующем точке т.3 у трубки ряда №7, что на 3 мм больше, чем максимальное значение среди слоев выявленных при обследовании на расстоянии 300 мм от стояка и меньше на 1 мм, чем максимальное значение толщины среди слоев выявленных при обследовании на расстоянии 600 мм от стояка. Минимальная толщина слоя 0 мм (слой отсутствует) зафиксирована при угле, соответствующем точке т.8, у трубки ряда №7.

Для углов 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315° усредненные по углам значения толщины слоя отложений равны: 2,3 мм; 9,7 мм; 19,0 мм; 11,7 мм; 10,7 мм; 3,6 мм; 2,7 мм; 2,5 мм соответственно. Выявлено, что на левой боковой стороне поверхности трубок усредненная толщина слоя отложений больше на 8,4 мм в сравнении с усредненной толщиной слоя отложений на правой боковой стороне поверхности трубок. Разница усредненной толщины между боковыми сторонами поверхности трубок на расстоянии 900 мм от стояка меньше на 0,5 мм, чем при измерении на расстоянии 300 мм от стояка и меньше на 0,2 мм, чем при измерении на расстоянии 300 мм от стояка. Для

фронтальной поверхности трубок рядов №2–№7, средняя толщина слоя отложений (3,6 мм; 2,7 мм; 2,5 мм) для всех трех точек измерений меньше минимального значения (9,7 мм) усредненной толщины слоя отложений на тыльной стороне поверхности трубок рядов №2–№7, что совпадает с данными измерений на расстоянии 300 и 600 мм от стояка. На фронтальной поверхности трубок прослеживается тенденция уменьшения усреднённого по углам значения толщины слоя отложений от точки т.6 к точке т.8. Минимальное значение усредненной по углам толщины слоя отложений (2,3 мм при угле соответствующем точке т.1) находится с правой боковой стороны поверхности трубок, а максимальное значение (19 мм в точке т.3) в центре тыльной стороны поверхности трубок рядов №2–№7.

Для тыльной стороны поверхности трубок разница между максимальными и минимальными значениями усредненных по углам толщины в точках измерения составляет 9,3 мм, а для фронтальной стороны поверхности аналогичная разница составляет 1,1 мм, что показывает более высокую неравномерность слоя отложений на фронтальной стороне поверхности.

Дополнительно были сделаны изображения слоев отложений при доступе через открытую дверцу зольника в нижней части секции конвективного пакета у котла КВ-ГМ-2,0, работающего на топочном мазуте (Приложение А, Рис. А.5, б). Аналогичным образом исследована толщина слоя отложений на наружной поверхности конвективных трубок, где толщина слоя составила 4 мм для всех точек измерения.

4.2. Определение средней толщины натрубных отложений

После завершения измерений толщины отложений таблица 3.2 дополнена новыми результатами и представлена в виде (табл. 4.6).

Уравнение регрессии записывается в виде:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots + b_{n-1,n}X_{n-1}X_n, \quad (4.1)$$

где n – количество факторов; b_0, b_1, b_2, b_3 – коэффициенты регрессионного уравнения вычисляются по выражению:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}, \quad (4.2)$$

где N – количество экспериментов.

Таблица 4.6 – Матрица планирования натурального обследования

№ эксперимента	X_1	X_2	X_3	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	$X_1X_2X_3$	\bar{y}
1	+	+	+	+	+	+	+	20
2	-	+	+	-	-	+	-	5
3	+	-	+	-	+	-	-	10
4	-	-	+	+	-	-	+	10
5	+	+	-	+	-	-	-	10
6	-	+	-	-	+	-	+	8
7	+	-	-	-	-	+	+	5
8	-	-	-	+	+	+	-	4

Значения коэффициентов, рассчитанные с применением выражения (4.2), представлены в табличной форме (табл. 4.7).

Таблица 4.7 – Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициент регрессии	Значение
b_0	9
b_1	2,25
b_2	1,75
b_3	2,25
b_{12}	2
b_{13}	1,5
b_{23}	-0,5
b_{123}	1,75

Для данного исследования уравнение регрессии с учетом данных таблицы 4.7 будет выглядеть:

$$y = 9 + 2,25X_1 + 1,75X_2 + 2,25X_3 + 2X_1X_2 + 1,5X_1X_3 - 0,5X_2X_3 + 1,75X_1X_2X_3, \quad (4.3)$$

Символ «+» в уравнении регрессии перед коэффициентом означает, что с увеличением значения фактора увеличивается значение функции отклика, равное значению на верхнем уровне, а символ «-» означает, что с уменьшением значения фактора уменьшается и значение функции отклика. Чем больше значение взятого по модулю коэффициента регрессионного уравнения, тем больше фактор оказывает влияние на функцию отклика. В уравнении регрессии (4.3) как сами факторы, так и их взаимодействия по степени оказываемого влияния на функцию отклика можно расположить в последовательности от большего влияния к меньшему:

- номер ряда трубок и угол точки измерения имеют независимо одинаково высокое влияние;
- взаимное влияние номера ряда трубок и расстояния от стенки котла;
- взаимное влияние всех факторов;
- взаимное влияние номера ряда трубок и угла точки измерения;
- взаимное влияние расстояния от стенки котла и угла точки измерения.

Искомая регрессионная зависимость с учетом раскодирования факторов по уравнению (2.1) будет иметь вид:

$$\delta_3 = 1,125Z_1 + 0,0192Z_2 + 0,161Z_3 - 0,0025Z_1Z_2 - 0,0222Z_1Z_3 - 0,000296Z_2Z_3 + 0,000065Z_1Z_2Z_3 - 5,5. \quad (4.4)$$

Гипотеза 1: усредненные значения толщины слоев отложений по длине труб примерно одинаковые, поэтому достаточно произвести измерения толщины отложений в одном сечении трубы, чтобы определить объем отложений, осевших по всей длине трубы методом произведения площади, занимаемой отложениями в поперечном сечении трубы на длину трубы. В таблице 4.8 представлены усредненные данные толщины отложений по 8 точкам для труб

№12 в 6 рядах на расстояниях 300, 600 и 900 мм от стояка, а также среднеарифметические значения толщины слоев отложений для каждого расстояния по всем рядам труб [97].

Таблица 4.8 – Усредненная толщина слоя отложений в разных точках измерений по длине труб

№ ряда труб	Расстояние от точки измерения до входа трубы в стояк, мм		
	300	600	900
2	6,50	5,75	6,88
3	8,75	8,06	6,63
4	6,56	4,88	6,00
5	7,50	7,19	7,56
6	8,38	8,00	10,06
7	8,56	10,50	9,38
Сумма	46,25	44,38	46,50
Среднее арифметическое значение	7,71	7,40	7,75

Усредненное значение толщины слоя отложений, мм [97]:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^6 y_{ij} = \frac{46,25 + 44,38 + 46,50}{18} = 7,62, \quad (4.5)$$

Межгрупповая сумма квадратов отклонений [97]:

$$SSB = \sum_{j=1}^3 n_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 = 6(7,71 - 7,62)^2 + 6(7,4 - 7,62)^2 + 6(7,75 - 7,62)^2 = 0,45. \quad (4.6)$$

Внутригрупповая сумма квадратов отклонений [97]:

$$SSW = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^6 (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 = (6,5 - 7,71)^2 + (8,75 - 7,71)^2 + (6,56 - 7,71)^2 + \dots + (6,88 - 7,75)^2 + (10,06 - 7,75)^2 + (9,38 - 7,75)^2 = 37,74. \quad (4.7)$$

Общая сумма квадратов отклонений, мм [97]:

$$SSE = SSB + SSW = 0,45 + 37,74 = 38,19. \quad (4.8)$$

Межгрупповая сумма квадратов отклонений, отнесённая к степени свободы равной единице:

$$S_1^2 = \frac{SSB}{m-1} = \frac{0,45}{3-1} = 0,225. \quad (4.9)$$

Внутригрупповая сумма квадратов отклонений, отнесенная к степени свободы равной единице:

$$S_2^2 = \frac{SSW}{n-m} = \frac{37,74}{18-3} = 2,516. \quad (4.10)$$

Критерий Фишера (F -критерий (вычисляемый)):

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2} = \frac{0,225}{2,516} = 0,0893. \quad (4.11)$$

Уровень значимости в данном дисперсионном анализе принят равным 5 %. Тогда при числе степеней свободы большей дисперсии равным 2-м и числе степеней свободы меньшей дисперсии равным 15-и значение критерия Фишера равно 3,68 [97].

Найденное значение F -критерия (критерия Фишера) меньше его табличного значения, следовательно, гипотеза 1 подтверждается и общая масса золотых отложений может определяться не количеством измерений по всей длине труб, а по измерению площади занимаемой отложениями в одном из поперечных сечений секции конвективного пакета с последующим ее умножением на длину труб для нахождения массы отложений. Результаты вычислений в ходе проведения однофакторного дисперсионного анализа при проверке гипотезы №1 сведены в таблицу 4.9.

Таблица 4.9 – Однофакторный дисперсионный анализ

Источник вариации	SS	df	MS	F	F критическое
Между группами	0,449653	2	0,224826	0,089347	3,68
Внутри групп	37,74479	15	2,516319	–	–
Итого	38,19444	17	–	–	–

Гипотеза 2: Полученные результаты натурального эксперимента не зависят от типа котла и могут применяться в расчетах для котлов аналогичных типов.

В таблице 4.10 представлены усредненные по 10 трубкам нижнего ряда значения толщины отложений для каждого угла точки измерений на расстоянии 250 мм от стояка, а также среднее арифметическое значение по каждому расстоянию для всех рядов труб [97].

Таблица 4.10 – Усредненная толщина золовых отложений в зависимости от угла точки измерения

Номер котла	Углы соответствующие точкам измерения							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	4,4	4,5	4,4	3,7	3,65	3,75	7,4	5,55
2	4,85	5,25	5,65	6,85	5,35	4,35	8,1	4,15
Сумма	9,25	9,75	10,05	10,55	9	8,1	15,5	9,7
Среднее арифметическое значение	4,63	4,88	5,03	5,28	4,50	4,05	7,75	4,85

Общее среднее значение толщины слоя отложений [97], мм:

$$y = \frac{9,25 + 9,75 + 10,05 + 10,55 + 9 + 8,1 + 15,5 + 9,7}{16} = 5,12. \quad (4.12)$$

Результаты остальных расчетов с использованием уравнений (4.6–4.11) сведены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11 – Однофакторный дисперсионный анализ №2

Источник вариации	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>F</i> критическое
Между группами	17,71438	7	2,530625	2,25571	3,51
Внутри групп	8,975	8	1,121875	–	–
Итого	26,68938	15	–	–	–

Уровень значимости в представленном дисперсионном анализе принят равным 5 %. Тогда при числе степеней свободы большей дисперсии равным 7-и и числе степеней свободы меньшей дисперсии равным 15-и значение критерия Фишера равно 3,51 [97].

Найденное значение F -критерия меньше табличного значения F -критерия, следовательно, гипотеза 2 подтверждается.

4.3. Определение коэффициентов загрязнения

Коэффициент теплопередачи k выражен из уравнения теплопередачи:

$$k = \frac{Q}{F \Delta t_{\text{ср}}} \quad (4.13)$$

где Q – количество переданной теплоты от греющего теплоносителя (продуктов сгорания) к поверхности конвективных труб, Вт; F – площадь теплопередающей поверхности (площадь наружной поверхности конвективных труб), м²; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разность температур продуктов сгорания и поверхности стенок труб, °С.

Коэффициент загрязнения ε определяется как разность термических сопротивлений слоя отложений и незагрязненной поверхности труб:

$$\varepsilon = \frac{1}{k_3} - \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_3} - \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}, \quad (4.14)$$

где ε – коэффициент загрязнения, м²·°С/Вт; k – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к незагрязненной поверхности трубы, Вт/(м·°С); α – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к наружной поверхности незагрязненной трубы, Вт/(м²·°С); α_3 – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к наружной поверхности слоя отложений, Вт/(м²·°С); λ_3 – коэффициент теплопроводности загрязняющих веществ, Вт/(м·°С); δ_3 – средняя толщина слоя отложений, м.

Результаты численного моделирования обобщены в виде графика (рис. 4.12).

Для создания обобщенной зависимости коэффициента загрязнения использовано уравнение регрессии (4.4).

Значения коэффициентов регрессии рассчитаны с применением зависимости (4.2) и представлены в табличной форме (табл. 4.12).

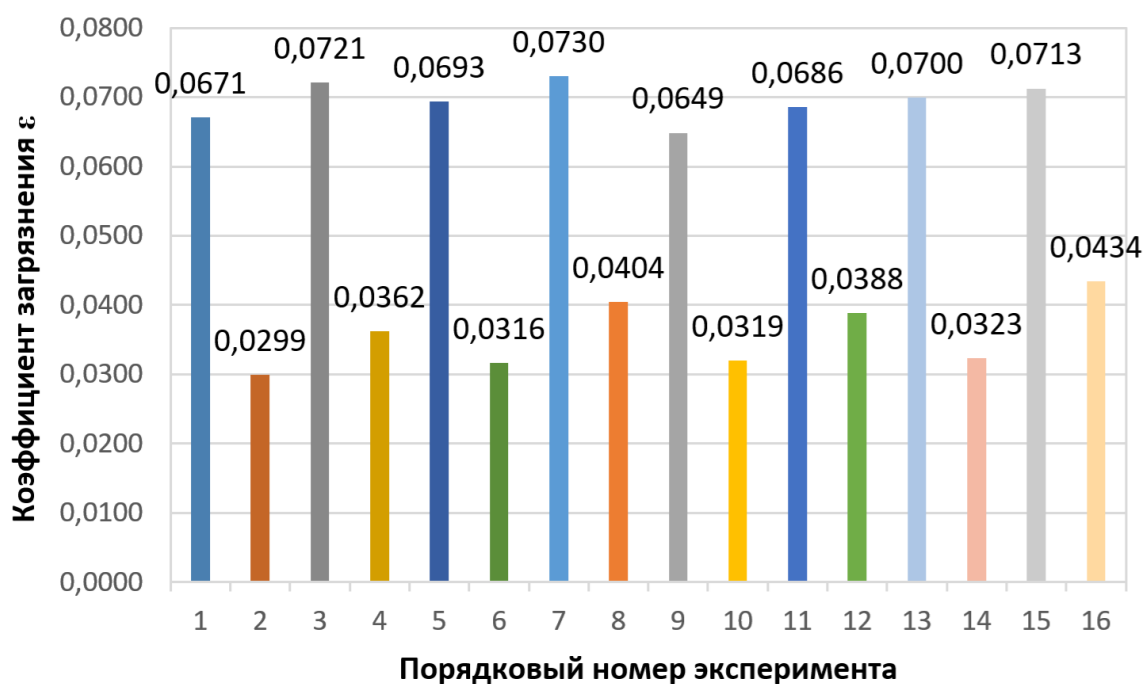


Рис. 4.12 – Значения коэффициентов загрязнения, полученных по результатам численного моделирования

Таблица 4.12 – Коэффициенты уравнения регрессии

Коэффициент регрессии	Значение
b_0	0,05255
b_1	-0,01698
b_2	0,002921
b_3	0,00136
b_4	$8,67 \cdot 10^{-5}$
b_{12}	0,001204
b_{13}	$-1,3 \cdot 10^{-5}$
b_{14}	0,000953
b_{23}	0,000195
b_{24}	$-5,0 \cdot 10^{-5}$
b_{34}	0,000227

b_{123}	0,000655
b_{124}	0,000413
b_{134}	-0,00035
b_{234}	$3,4 \cdot 10^{-5}$
b_{1234}	0,00017

После преобразования с учетом полученных по результатам численного моделирования данных и значений коэффициентов регрессии, представленных в табл. 4.12 уравнение регрессии примет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 0,05255 - 0,01698X_1 + 0,002921X_2 + 0,00136X_3 + 8,67X_4 \cdot 10^{-5} + \\ & + 0,001204X_1X_2 - 1,3X_1X_3 \cdot 10^{-5} + 0,000953X_1X_4 - 5X_2X_4 \cdot 10^{-5} + \\ & + 0,000227X_3X_4 + 0,000655X_1X_2X_3 + 0,000413X_1X_2X_4 - 0,00035X_1X_3X_4 + \\ & + 3,4X_2X_3X_4 \cdot 10^{-5} + 0,00017X_1X_2X_3X_4. \quad (4.15) \end{aligned}$$

Символ «+» в уравнении регрессии перед коэффициентом означает, что с увеличением значения фактора увеличивается значение функции отклика, равное значению на верхнем уровне, а символ «-» в уравнении регрессии перед коэффициентом означает, что с уменьшением значения фактора уменьшается значение функции отклика. Чем больше значение взятого по модулю коэффициента регрессионного уравнения, тем больше фактор, к которому относится данный коэффициент, оказывающий влияние на функцию отклика.

После раскодирования факторов в зависимости от S_1 , d_n и $G_{п.с}$ для двух схем размещения трубок в пакете (шахматной или коридорной), а также видов форм профиля наружной поверхности поперечного сечения трубок уравнение (4.15) преобразуется к виду, представленному в (табл. 4.13).

Представленные расчетные формулы применимы в диапазоне расхода продуктов сгорания $G_{п.с}$ от 0,091 до 0,297 кг/с и относительном поперечном шаге труб в пучке с поперечным омыванием потоком продуктов сгорания от 1,98 до 2,38.

Модели, показывающие прогнозируемую форму образовавшихся натрубных отложений в сечении для котла №1 полученные в ходе проведения

численного моделирования конвективного пакета, представлены в Приложении Б (для круглых труб – рис. Б.1–Б.2, *a–z*, для овоидальных труб – рис. Б.3–Б.4, *a–z*).

Таблица 4.13 – Расчетные зависимости для определения коэффициентов загрязнения ε

Форма профиля наружной поверхности поперечного сечения труб	Схема расположения труб в пучке	
	Коридорная	Шахматная
Круглая	$\varepsilon = \sigma_1(0,05781G_{п.с} - 0,00987) - 0,27287G_{п.с} + 0,10706$ (4.16)	$\varepsilon = \sigma_1(0,00081G_{п.с} + 0,00165) - 0,18473G_{п.с} + 0,0827$ (4.17)
Овоидальная	$\varepsilon = \sigma_1(0,07489G_{п.с} - 0,01549) - 0,32259G_{п.с} + 0,1186$ (4.18)	$\varepsilon = \sigma_1(0,05169G_{п.с} - 0,01045) - 0,28265G_{п.с} + 0,10424$ (4.19)

4.3.1. Зависимости образования отложений от расхода продуктов сгорания

В результате численного моделирования работы конвективного пакета с режимными параметрами работы котла: температура дымовых газов на выходе из топки $t_{пс} = 806$ °С; концентрация золовых частиц $\mu_{зп} = 2,049 \cdot 10^{-6}$ кг/с; геометрические характеристики конвективного пакета $\sigma_2 = 1,98$, σ_1 от 1,98 до 2,38, $d_n = 48$ мм, получены коэффициенты загрязнения конвективных пакетов для котлов КВу-1,0 при работе в условиях запыленного потока. Моделирование выполнялось для значений расхода продуктов сгорания в диапазоне от

0,091 кг/с (для режима нагрузки котла 40 %) до 0,297 кг/с (для режима нагрузки котла 100 %).

По результатам численного моделирования построены зависимости $\varepsilon = f(G_{\text{пс}})$, представленные на рис. 4.13:

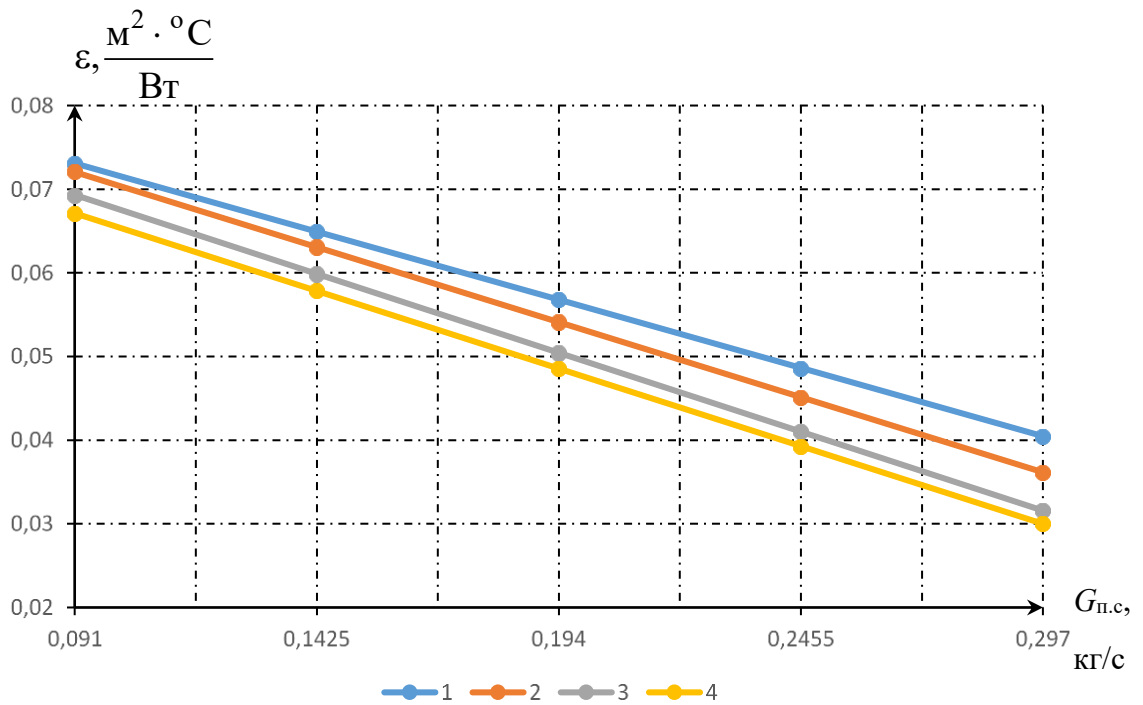


Рис. 4.13 – Зависимости коэффициентов загрязнения ε от расхода продуктов сгорания $G_{\text{пс}}$ для конвективных пакетов при $\sigma_1 = 1,98$: 1) – коридорный пучок с трубами круглой формы сечения (зависимость 4.16); 2) – коридорный пучок с трубами овоидальной формы сечения (зависимость 4.18); 3) – шахматный пучок с трубами круглой формы сечения (зависимость 4.17); 4) – шахматный пучок с трубами овоидальной формы сечения (зависимость 4.19)

Зависимость коэффициентов загрязнения конвективного пакета ε от расхода продуктов сгорания $G_{\text{пс}}$ представляет собой растущую зависимость при уменьшении расхода газов $G_{\text{пс}}$, что согласуется с данными исследований других авторов. Коэффициенты загрязнения при расходе 0,091 кг/с в конвективных пакетах с коридорной схемой размещения труб близки друг к другу по значениям у труб как с овоидальной, так и с круглой формой профиля наружной поверхности. Темп снижения термического сопротивления (коэффициен-

тов загрязнения) при увеличении расхода газов по сравнению с трубами круглого сечения в коридорном пучке у овоидальных труб больше, чем у овоидальных труб в шахматном пучке.

Для других значений относительного продольного шага σ_2 график выглядит аналогично.

4.3.2. Зависимости образования отложений от схемы размещения труб в конвективных пакетах

В результате численного моделирования конвективного пакета с режимными параметрами работы котла: температура дымовых газов на выходе из топки $t_{\text{пс}} = 806$ °С, расход продуктов сгорания $G_{\text{п.с}} = 0,297$ кг/с, концентрация золовых частиц $\mu_{\text{зл}} = 2,049 \cdot 10^{-6}$ кг/с; геометрические характеристики конвективного пакета $\sigma_2 = 2,6$, $d_{\text{н}} = 48$ мм, получены коэффициенты загрязнения двух секций конвективных пакетов у котлов КВу-1,0 при работе в условиях запыленного потока. Моделирование выполнялось для значений относительного продольного шага размещения труб в секции пакета $\sigma_1 = S_1/d_{\text{н}}$ в диапазоне от 1,98 до 2,38 с шагом в 0,2 (рис. 4.14). Остальные параметры конструкции, такие как: наружный диаметр труб, относительный продольный шаг труб, размеры входных и выходных сечений для продуктов сгорания остаются постоянными.

Зависимость коэффициента загрязнения ε от относительного продольного шага размещения труб в конвективном пакете представляет растущую зависимость при увеличении относительного шага труб.

Опытные данные [53] показывают, что увеличение относительного поперечного шага $\sigma_1 = S_1/d_{\text{н}}$ при шахматной схеме размещения труб в пучке не оказывает существенного влияния на коэффициент загрязнения ε , что подтверждается численным моделированием как на моделях с круглыми трубками, так и на моделях с овоидальными трубками. Коэффициенты загрязнения для шахматной схемы размещения труб в пучке достаточно близки друг к другу как

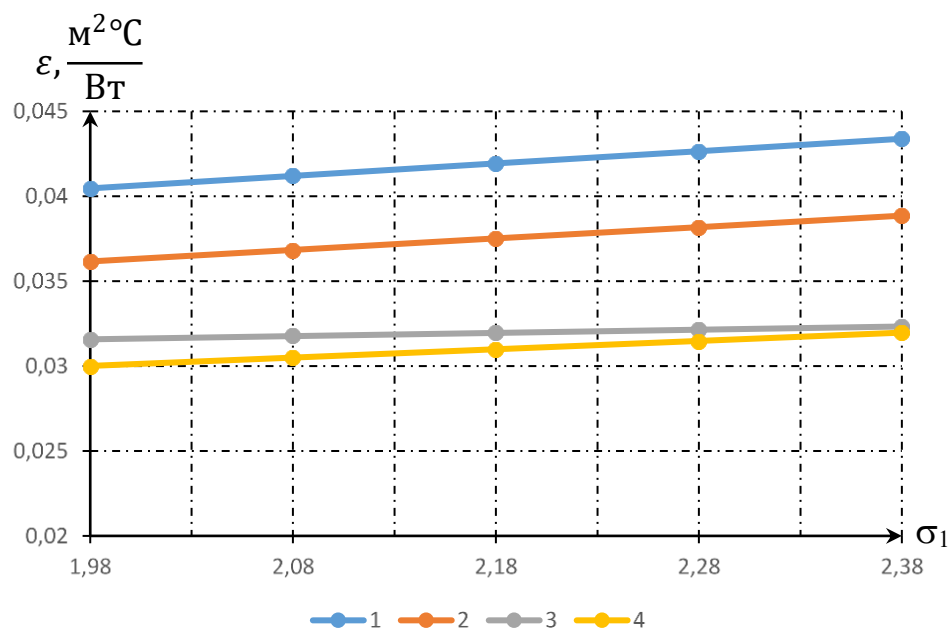


Рис. 4.14 – Зависимость коэффициентов загрязнения ε от относительного шага σ_1 при $G_{п.с} = 0,297$ кг/с для конвективных пакетов: 1) – коридорный пучок с трубами круглой формы сечения (зависимость 4.16); 2) – коридорный пучок с трубами овоидальной формы сечения (зависимость 4.18); 3) – шахматный пучок с трубами круглой формы сечения (зависимость 4.17); 4) – шахматный пучок с трубами овоидальной формы сечения (зависимость 4.19)

для моделей с круглыми, так и с овоидальными трубками. В случае коридорной схемы размещения разница между круглыми и овоидальными трубками более существенна. Исследования показали, что коэффициент загрязнения для моделей с овоидальными трубками во всем исследованном диапазоне изменения относительного продольного шага σ_2 в 1,12 раз меньше в сравнении с круглыми трубками.

4.4. Инженерная методика теплового расчёта конвективных пакетов

Величиной, отражающей влияние на теплообмен сажистых и золовых отложений в инженерной расчетной методике теплового расчета конвективных поверхностей нагрева водотрубных котлов разработанной совместно [89] Всероссийским теплотехническим институтом (ВТИ) и Центральным котлотурбинным институтом (ЦКТИ) предложен коэффициент загрязнения ε ($\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C} / \text{кДж}$), представляющий собой величину термического сопротивления

загрязнений. Утверждается, что представленные в методике [89] коэффициенты загрязнения ε недостаточно универсальны для большинства типов котлоагрегатов [71].

В нормативном методе [89] для учета загрязнения наружной поверхности теплообменных труб в секциях конвективных пакетов предлагается использовать коэффициент загрязнения ε , принимаемый как произвольная константа в рекомендуемых пределах. Константа подставляется в расчетную зависимость для определения средней абсолютной температуры наружной поверхности стенок теплообменных труб конвективного пакета [82, 100]:

$$T_3^{\text{cp}} = t_2^{\text{cp}} + \left(\varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \frac{B_p}{F} Q_6 + 273, \quad (4.20)$$

где t_2^{cp} – средняя температура нагреваемого теплоносителя в конвективных пакетах, °С; ε – коэффициент загрязнения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С} / \text{кДж}$; α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней поверхности труб пучка к нагреваемому теплоносителю, $\text{кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°С})$; B_p – расчетный расход топлива, кг/ч; F – площадь теплопередающей поверхности конвективных труб, м^2 ; Q_6 – количество теплоты, воспринятое конвективным пакетом по балансу, кДж/кг.

Автором диссертационной работы предлагается вместо рекомендуемых констант для нахождения коэффициентов загрязнения ε [89] использовать полученные уточненные расчетные зависимости (см. табл. 4.13), позволяющие повысить точность тепловых расчетов водотрубных котлов малой мощности.

Кроме коэффициента загрязнения ε , влияние натрубных загрязнений на процессы передачи теплоты в расчетной методике теплового расчета конвективных поверхностей так же учитывается при помощи коэффициент тепловой эффективности ψ [18], который может быть вычислен по зависимости:

$$\psi = \frac{k_3}{k}, \quad (4.21)$$

где k_3 – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к загрязненной поверхности стенки трубы, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$, определяется по уравнению (4.22); k – коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к незагрязненной поверхности стенки трубы, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$; определяется по уравнению (4.23).

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \varepsilon}, \quad (4.22)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}}, \quad (4.23)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке конвективных труб, $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$; ε – коэффициент загрязнения, $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}/\text{кДж}$.

После преобразований уравнения (4.21) итоговая зависимость для нахождения коэффициента тепловой эффективности ψ примет вид:

$$\psi = \frac{1}{\alpha_1 \varepsilon + 1}. \quad (4.24)$$

Тепловой расчет конвективной поверхности нагрева для котла КВу-1,0, выполненный по нормативному методу [89] с использованием предлагаемой автором методики расчета коэффициентов загрязнения ε представлен в Приложении В. При выполнении расчетов по инженерной методике теплового расчета конвективных поверхностей нагрева на ЭВМ в программе *Microsoft Excel* при вычислении средней абсолютной температуры наружной поверхности стенок теплообменных труб конвективного пакета следует использовать функцию вида «ЕСЛИ($t_3^{\text{ср}} > t_{\text{п.с}}^{\text{ср}} ; t_3^{\text{ср}} = t_{\text{п.с}}^{\text{ср}} ; t_3^{\text{ср}} \rangle$)», в ином случае при подстановке больших значений величины коэффициента ε загрязнения возможны ошибки, связанные с завышенными значениями температуры.

4.5. Рекомендации по повышению тепловой эффективности конвективных пакетов котлов эксплуатирующихся в условиях запыленного потока дымовых газов

При разработке новых либо при реконструкции уже существующих конвективных пакетов водотрубных котлов малой мощности рекомендуется использовать трубки с овоидальным профилем сечения наружной поверхности. Это позволит создавать более компактные конструкции аналогичной площади поверхности нагрева, менее подверженные процессам осаждения на наружной поверхности сажистых и золовых частиц.

В тепловых расчетах конвективных поверхностей нагрева по нормативному методу рекомендуется использовать коэффициент загрязнения ϵ определяемый по предложенным в таблице 4.13 зависимостям, учитывая следующую последовательность действий:

1. Выбрать требующуюся зависимость, подходящую по конструкции к рассчитываемому конвективному пакету (форма профиля поперечного сечения труб: – овоидальная, круглая; схема размещения труб в пучке – шахматная, овоидальная;

2. Использовать параметры конструкции в выбранной зависимости в качестве определяющих параметров, а также значения среднего расхода продуктов сгорания;

3. Найденное значение коэффициента загрязнения ϵ использовать в уравнении для определения средней абсолютной температуры наружной поверхности стенок теплообменных труб конвективного пакета (4.20) и коэффициента тепловой эффективности (4.24).

4.6. Выводы по разделу 4

1. Представлены результаты измерений толщины отложений в точках по периметру труб нижнего ряда для двух водотрубных котлов КВу-1,0;

2. Выявлены профили наружной поверхности отложений для труб нижнего ряда;

3. Установлена степень влияния физических факторов, конструкции конвективного пакета и режимных параметров работы котлоагрегата на толщину отложений;

4. Проведением дисперсионного анализа доказано, что допустимо определять толщину образовавшихся отложений в одном сечении;

5. Получено уравнение регрессионной зависимости толщины отложений от: местоположения конвективной трубки в ряду пучка (номера трубки), угла соответствующего точкам проведения измерений и расстояния от боковой стенки котла;

6. Доказано, что результаты натурного эксперимента не являются уникальными для одного котла типа КВу-1,0, а могут распространяться на аналогичные типы котлов;

7. Предложено уравнение регрессионной зависимости для коэффициентов загрязнения ϵ от расхода продуктов сгорания, формы поперечного сечения конвективных труб, шага труб и схемы размещения труб в пучке;

8. Предложена усовершенствованная методика для уточнения коэффициентов загрязнения ϵ в зависимости от режимных параметров работы котлов и характеристик конструкции конвективных пакетов с использованием полученной регрессионной зависимости.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Выявлены основные физические явления и факторы, оказывающие основное влияние на активность процессов осаждения сажистых и золовых частиц на поверхности труб конвективных пакетов в котлах малой мощности;

2. Разработаны математические и численные модели образования сажистых и золовых отложений с учетом режимов работы котлов и особенности конструкции конвективных пакетов;

3. Выявлены формы профиля наружной поверхности золовых отложений на трубах в нижнем ряду трубок конвективных пакетов у двух водотрубных котлов типа КВу-1,0, отражающие области с наибольшей склонностью к зарастанию межтрубных проходных каналов;

4. Предложена наиболее обтекаемая форма труб, снижающая термические сопротивления сажистых и золовых отложений в процессе эксплуатации оборудования;

5. Получена регрессионная зависимость толщины натрубных отложений от местоположения поверхности осаждения конвективного пакета в пространстве;

6. Получены зависимости коэффициентов загрязнения ϵ от особенностей конструкции конвективных пакетов и режимного параметра работы котлов;

7. Усовершенствована методика теплового расчёта конвективных пакетов, позволяющая вычислять коэффициенты загрязнения ϵ в зависимости от особенностей конструкции конвективных пакетов и режимов работы оборудования.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в усовершенствовании численной модели для определения влияния таких факторов, как наружный диаметр конвективных труб, относительный продольный шаг труб, зольность топлива с получением соответствующих зависимостей для практического применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, Д. В. Введение в гидродинамику: [учеб. пособие]/Д. В. Александров, А. Ю. Зубарев, Л. Ю. Исакова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – 112 с.;
2. Алехнович, А. Н. О расчёте вязкости расплава шлака и использовании данных для анализа работы пылеугольных котлов / А. Н. Алехнович, Н. В. Артемьева, В. В. Богомолов // Сб. научн. статей "Современная наука". – 2010. – № 3 (5). – С. 45–50;
3. Алехнович, А.Н. Изучение шлакующих свойств золы углей, поступающих на электростанции Западной Сибири и Урала / А.Н. Алехнович, В.В. Богомолов, Э.П. Дик, Н.И. Иванова // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Тез. докл. III Всес. конф. Т. 1А. – Таллин: ТПИ, 1980, С. 81–86;
4. Алехнович, А. Н. Моделирование и имитация налипания частиц золы / Алехнович А. Н. – (Тепловые электростанции). – Текст: непосредственный // Электрические станции. – 2017. – № 9. – С. 15–23: 4 рис., 4 табл. – Библиогр.: с. 22–23 (27 назв.). – ISSN 0201-4564;
5. Алехнович А.Н. Шлакование пылеугольных энергетических котлов. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2013. – 112 с.: ил. [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 8 (176)];
6. Архипов В. А., Басалаев С. А., Перфильева К. Г., Усанина А. С. Коэффициент сопротивления твердой сферы в неизотермических условиях // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2021. №71. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsient-soprotivleniya-tverdoy-sfery-v-neizotermicheskikh-usloviyah> (дата обращения: 15.03.2025);
7. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение частиц дисперсной фазы в несущей среде: учеб. пособие. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 252 с.;

8. Астафьева О.Е. Применение золошлаковых отходов в промышленности строительных материалов // Уголь. – 2024. – № 2. – С. 85–88. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-2-85-88;
9. Бакиров Ф.Г. и др. Образование и выгорание сажи при сжигании углеводородных топлив / Ф.Г. Бакиров, В.М. Захаров, И.З. Полещук, З.Г. Шайхутдинов. – Машиностроение, 1989. – 128 с.: ил.;
10. Белый В.В. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт / В.В. Белый, С.В. Порозов, В.В. Васильев и [др.] // Теплофизика и аэромеханика. – 2007. – Т. 14. – № 2. – С. 299–312;
11. Белоглазов В.П. Теоретические основы теплотехники. Теплопередача: Учебное пособие. – Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2016. – 118 с.;
12. Бойко Е.А., Жадовец Е.М., Шишмарев П.В. Численное моделирование процесса образования отложений на полурадационных поверхностях нагрева БКЗ-420-140 ПТ1 // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 382–388;
13. Бойко Е.А., Загородний И.В. Комплексное исследование интенсивности шлакования поверхностей нагрева котлоагрегата при сжигании непроектных топлив // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2020. – Т. 22. – № 6. С. 101–116., doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116;
14. Бочкарев В. А., Фролов А. Г. Работа котлов КВТС-20 и КВТСВ-20 с организацией вихревого движения дымовых газов над слоем топлива // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №3 (98). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rabota-kotlov-kvts-20-i-kvtsv-20-s-organizatsiey-vihrevogo-dvizheniya-dymovyh-gazov-nad-sloem-topliva> (дата обращения: 01.08.2024);
15. Буваков К. В., Заворин А. С., Гладков В. Е. Морфологические особенности золы от энергетического сжигания бурого угля // Известия ТПУ. 2006. №5.

- URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/morfologicheskie-osobennosti-zoly-ot-energeticheskogo-szhiganiya-burogo-uglya> (дата обращения: 10.01.2025);
- 16.Бураков В. С., Желудок В. В., Ставров А. А. Исследование воздействия лазерного излучения на сажистые частицы пламени Физика горения и взрыва: Минск. – 1974. – № 2. С. 256–259.;
 - 17.Вараксин А. Ю., Протасов М. В., Яценко В. П., Анализ механизмов осаждения твердых частиц на стенки каналов, ТВТ, 2013, том 51, выпуск 5, 738–746;
 - 18.Вафин Д.Б. Котельные установки и парогенераторы: учебное пособие / Д.Б. Вафин. – Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2013. – 176 с.;
 - 19.Вдовенко М.И., Бадакер В.С., Киселев Н.Б., Москаленко Л.В. Влияние минеральной части энергетических углей на работу котлоагрегатов. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 284 с.;
 - 20.Галанин М.П., Исаев А.В., Конев С.А. О моделировании образования сажи при диффузионном горении углеводородных топлив // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2019. № 110. 32 с. doi:10.20948/prepr-2019-110 URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2019-110>;
 - 21.Герасимова Н.П. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов. Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 596–605. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-3-596-605>;
 - 22.Герасимова Н. П., Буйнов Н. Е. Обеспечение эффективной очистки топочной камеры обдувочными аппаратами // Вестник ИрГТУ. – 2015. – №12 (107). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obespechenie-effektivnoy-ochistki-topochnoy-kamery-obduvochnymi-apparatami> (дата обращения: 03.08.2024);
 - 23.Гиль А. В., Заворин А. С., Красильников С. В., Обухов С. В., Старченко А. В. Исследование аэродинамики и горения в топке котла БКЗ-420-140 применительно к вариантам замещения проектного топлива // Известия ТПУ. –

2007. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-aerodinamiki-i-goreniya-v-topke-kotla-bkz-420-140-primenitelno-k-variantam-zamescheniya-proektnogo-topliva> (дата обращения: 03.08.2024);
24. Глазков Д. Ю. Процесс сажеобразования в цилиндре дизеля и методы его моделирования // Известия КГТУ. – 2018. – №48. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-sazheobrazovaniya-v-tsilindre-dizelya-i-metody-ego-modelirovaniya> (дата обращения: 12.08.2024);
25. Горбис З.Р. Теплообмен и гидродинамика дисперсных сквозных потоков. М.: "Энергия", 1970;
26. Двойнишников В.А. и др. Конструкция и расчет котлов и котельных установок: Учебник для техникумов по специальности «Котлостроение»/ В.А. Двойнишников, Л.В. Деев, М.А. Изюмов. – М.: Машиностроение, 1988 – 264 с.: ил.;
27. Деев Р. Теплоаэродинамические характеристики шахматного смешанного пучка круглых и каплевидных труб//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2022. – Т.23, вып. 2.
<http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-2/articles/987/>;
28. Деев Р. Экспериментальное и численное исследование влияния угла атаки на характеристики воздушного потока при обтекании одиночной каплевидной трубы//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. – 2021. – Т.22, вып. 2. <http://chemphys.edu.ru/issues/2021-22-2/articles/932/>;
29. Деев Р., Сиденков Д. В. Численное исследование теплообмена и аэродинамики одиночных труб каплевидной формы // Вестник МАХ. – 2020. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-issledovanie-teploobmena-i-aerodinamiki-odinochnyh-trub-kaplevidnoy-formy> (дата обращения: 28.07.2025);
30. Деревич И.В., Зайчик Л.И. Осаждение частиц из турбулентного потока // Изв. АН СССР. МЖГ. – 1988. – № 5. – С. 96.;

31. Деревич И. В., Клочков А. К. ФЛУКТУАЦИИ СКОРОСТИ ЧАСТИЦЫ В ВЯЗКОМ ГАЗЕ СО СЛУЧАЙНОЙ СКОРОСТЬЮ В ВИДЕ СУММЫ ДВУХ КОРРЕЛИРОВАННЫХ ЦВЕТНЫХ ШУМОВ // Математика и математическое моделирование. – 2020. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fluktuatsii-skorosti-chastitsy-v-vyazkom-gaze-so-sluchaynoy-skorostyu-v-vide-summy-dvuh-korrelirovannyh-tsvetnyh-shumov> (дата обращения: 24.07.2025);
32. Дик Э.П. Влияние минеральной части твердого топлива и методов сжигания на свойства золовых отложений // Минеральная часть топлива и ее роль в работе энергетических устройств: Матер. Всес. научно-техн. совещ. – Алма-Ата: КазНИИЭ, 1971. – С. 8–13.;
33. Заворин А. С., Раков Ю. Я. Численное моделирование процессов сжигания углей с учетом их минеральной части: состояние вопроса // Известия ТПУ. – 2004. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-protsessov-szhiganiya-ugley-s-uchetom-ih-mineralnoy-chasti-sostoyanie-voprosa> (дата обращения: 11.08.2024);
34. Заворин А. С., Раков Ю. Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах // Известия ТПУ. – 2005. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fenomenologicheskie-modeli-obrazovaniya-natrubnyh-otlozheniy-v-kotlah> (дата обращения: 03.08.2024);
35. Заворин А.С. Метод и установка для измерения теплопроводности натрубных отложений поверхностей нагрева пылеугольных котлов [Электронный ресурс] / А. С. Заворин, А. В. Кузьмин, Ю. Я. Раков // Теплофизические основы энергетических технологий : сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 24 – 26 июня 2010 г., г. Томск / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) ; ред. коллегия Г. В. Кузнецов [и др.]. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 292–297.;

- 36.Заворин А. С. Фактор минеральной части в технологии сжигания низкосортных углей: ретроспектива опыта конструирования и эксплуатации котлов // Векторы благополучия: экономика и социум. – 2011. – №1 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/faktor-mineralnoy-chasti-v-tehnologii-szhiganiya-nizkosortnyh-ugley-retrospektiva-opyta-konstruirovaniya-i-ekspluatatsii-kotlov> (дата обращения: 11.08.2024);
- 37.Зеттлер Х. У. Влияние свойств поверхности и распределения потока на загрязнение поверхностей теплообмена / Пер. с англ. – СПб.: Страта, 2014. – 452 с;
- 38.Зимон, А. Д. Адгезия пыли и порошков / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1967. – 372 с.: ил.;
- 39.Зуев А.А. Экспериментально-аналитическое исследование степени черноты рабочих поверхностей деталей цилиндрической поршневой группы дизельных двигателей // Ползуновский вестник. – 2013. – №4–3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalno-analiticheskoe-issledovanie-stepeni-chernoty-rabochih-poverhnostey-detaley-tsilindro-porshnevoy-gruppy-dizelnyh> (дата обращения: 13.08.2024);
- 40.Картушинский А. И., Крупенский И. А., Тислер С. В., Хусаинов М. Т., Щеглов И. Н., Осаждение твердых частиц в ламинарном пограничном слое на плоской пластине, ТВТ, 2009, том 47, выпуск 6, 927–936;
- 41.Качанов, И.В. Механика жидкости и газа: курс лекций: в 4 ч. / И.В. Качанов, В.В. Кулебякин, В.К. Недбальский. – Минск: БНТУ, 2012. – Ч. 3. – 56 с.;
- 42.Каштанов Д.И., Яковлев В.А. Анализ влияния смещения рядов конвективных трубок на эффективность теплопередачи в водотрубных котлоагрегатах // Инновации и инвестиции. – 2024. – №6. – С. 385–389.;
43. Каштанов Д.И. Определение скорости осаждения сажистых частиц в конвективных пучках водотрубных котлов // Вестник гражданских инженеров. – 2025. – №2 (109). – С. 95-105.;

44. **Каштанов Д.И.** Исследование золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных блоков твердотопливного котла малой мощности. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025 – 5(4): –С.50–62. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-50-62> EDN: AWFLEP;
45. Кашцев, В. М. Движение частиц в пристенной области турбулентного потока газа [Текст] / В. М. Кашцев, Ю. В. Муранов. – Обнинск : [б. и.], 1973. – 51 с. : ил.; 29 см. – (Препринт/ Физ.-энерг. ин-т; ФЭИ-420);
46. Керученко Л. С. Механизм осаждения частиц загрязнений в капиллярных каналах / Л. С. Керученко, Е. И. Мальцева // *Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции, 18–20 мая 2017 г., Юрга*. – Томск : Изд-во ТПУ, 2017. – С. 288-293.;
47. Клименюк И. В., Арапко А. А. Процесс образования отложений на теплообменных поверхностях // *Вестник ИШ ДВФУ*. – 2011. – №1 (6). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/protsess-obrazovaniya-otlozheniy-na-teploobmennyyh-poverhnostyah> (дата обращения: 13.08.2024);
48. Козлов А.Н. Улучшение экологических показателей дизеля путем снижения дымности отработавших газов при работе на этаноле и рапсовом масле: дис. ... канд. техн. наук / Козлов А.Н. – Кировск, 2019. – 207 с.;
49. Колесов, Д. С. Система технической диагностики процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата П-49 в составе энергоблока К-500-240 Назаровской ГРЭС [Электронный ресурс] : магистерская диссертация : 13.04.01 / Д. С. Колесов. – Красноярск: СФУ, 2017;
50. Комарова Л.Ф., Кормина Л.А. Инженерные методы защиты окружающей среды. Техника защиты атмосферы и гидросферы от промышленных загрязнений: Учебное пособие. – Барнаул, 2000. – 395с.;
51. Кондратьев А.С., Нья Т.Л., Швыдько П.П. Анализ движения крупных частиц в горизонтальных и вертикальных трубах // *Современные наукоемкие*

- технологии. – 2017. – № 11. – С. 31–39; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36841> (дата обращения: 02.08.2024);
52. Кононов Д. С., Гидаспов В. Ю., Стрижак С. В. Упрощенные кинетические модели горения метана для расширения возможностей пакета OPENFOAM и физико-химических библиотек // Труды ИСП РАН. – 2021. – №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/uproschennye-kineticheskie-modeli-goreniya-metana-dlya-rasshireniya-vozmozhnostey-paketa-openfoam-i-fiziko-himicheskikh-bibliotek> (дата обращения: 15.12.2024);
53. Кузнецов Н.В. Рабочие процессы и вопросы усовершенствования конвективных поверхностей котельных агрегатов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 171 с;
54. Кузьмин В. А., Заграй И. А. Определение формы и размеров частиц при сжигании торфа в топке водогрейного котла, Original Research Journal, 2021. – №11. – С. 176–185;
55. Лашкин С.В., Козелков А.С., Ялозо А.В., Герасимов В.Ю., Зеленский Д.К. Исследование эффективности параллельной реализации алгоритма SIMPLE на многопроцессорных ЭВМ, Вычислительная механика сплошных сред. – 2016. – Т. 9, № 3. – С. 298–315;
56. Лебедев Б. В. Золовые отложения в конвективных поверхностях нагрева котла при сжигании немолотого угля // Известия ТПУ. – 2010. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/zolovye-otlozheniya-v-konvektivnyh-poverhnostyah-nagreva-kotla-pri-szhiganii-nemolotogo-uglya> (дата обращения: 04.08.2024);
57. Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. Котельные установки и парогенераторы. – Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003, 592 с.;
58. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с., 311 ил., 22 табл.;

59. Лугуманов Т.Т., Кулешов В.С. К моделированию динамики системы флюид–дисперсная среда // Труды Института механики имени Р.Р. Мавлютова Уфимского Научного центра Российской Академии Наук. – 2014. – № 10. – С. 66–72.;
60. Любимова О.Н., Сиськов В.В. Математическое моделирование и методы анализа экспериментальных исследований в механике композиционных материалов: учебное пособие для вузов / политехнический институт ДВФУ. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2023. – 1 CD. [95 с.]. – Систем. требования: Acrobat Reader, Foxit Reader или любой другой их аналог. – ISBN 978-5-7444-5441-8. – Текст: электронный;
61. Любов В. К., Кузьмин М. С., Буторин А. Ю., Минин В. А. Экспериментальное исследование выбросов сажевых частиц котельными установками // Вестник Череповецкого государственного университета. 2015. – №5 (66). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-issledovanie-vybrosov-sazhevyh-chastits-kotelnyimi-ustanovkami> (дата обращения: 02.04.2025);
62. Любов В. К., Романов А. Ю. Исследование эффективности работы отопительных котельных // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2011. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-effektivnosti-raboty-otopitelnyh-kotelnyh> (дата обращения: 26.07.2024);
63. Малай Н.В., Щукин Е.Р. Фото- и термофорез нагретых умеренно крупных аэрозольных частиц сферической формы. – 2019. – Журнал технической физики, 89(4); С. 500–506.;
64. Мансуров З. А. Образование сажи полициклических ароматических углеводородов, фуллеренов и углеродных нанотрубок при горении углеводорода // Инженерно-физический журнал. 2011. – Т. 84, № 1. – С. 116–149.;
65. Матвиенко О. В., Андропова А. О., Андриасян А. В., Мамадраимова Н. А., Математическое моделирование движения сферической частицы по наклонной поверхности в сдвиговом потоке, Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех., 2018, номер 52, С. 75–88;

66. Меледина Т.В., Данина М.М. Методы планирования и обработки результатов научных исследований: Учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 110 с.;
67. Морозов А. Н. Броуновское движение как необратимый немарковский процесс // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2019. – №2 (83). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/brounovskoe-dvizhenie-kak-neobratimyy-nemarkovskiy-protsess> (дата обращения: 23.07.2025);
68. Мосин Е А., Закоурцев Г Н. Влияние температуры сжигания пыли назаровского угля в опытной установке на интенсивность образования связанных отложений // Известия ТПУ. – 1976. – Т. 226 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-temperatury-szhiganiya-pyli-nazarovskogo-uglya-v-opytной-ustanovke-na-intensivnost-obrazovaniya-svyazannyh-otlozheniy> (дата обращения: 14.01.2025);
69. Мустафаева Г. Р. Осаждение твердых частиц из потока суспензии // Транспорт и хранение нефтепродуктов. – 2017. – №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osazhdenie-tverdyh-chastits-iz-potoka-suspenzii> (дата обращения: 29.01.2025);
70. Насыров В. В., Насырова М. Г. О применимости закона Стокса // МСМ. – 2020. – №2 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-primenimosti-zakona-stoksa> (дата обращения: 12.08.2025);
71. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках. Изд. 2-е испр. и доп. Изд-во «Металлургия», 1971, с. 440.;
72. Одинцов В. И., Глазков Д. Ю. Некоторые закономерности образования сажи в цилиндрах судовых дизелей // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. – 2014. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-zakonomernosti-obrazovaniya-sazhi-v-tsilindrah-sudovyh-dizeley> (дата обращения: 13.08.2024);
73. Отс А.А. Коррозия и износ поверхностей нагрева котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 272 с.: ил.;

74. Отс А.А. Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей // М.: Энергия. 1977.– 311 с;
75. Патент РФ №2557600 Прибор для измерения толщины слоя сыпучих материалов в технологических емкостях : № 2014116696/28 : заявл. 24.04.2014 : опубл. 27.07.2015 / Н.П. Тишанинов, А.В. Анашкин ; патентообладатель Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВНИИТиН Россельхозакадемии);
76. Пашукевич С. В. Образование и влияние сажи на моторные масла // Вестник СибАДИ. – 2023. – Т. 20, – № 2 (90). – С. 248-259. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-2-248-259>;
77. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб / Е. Н. Письменный. – Киев : Альтерпрес, 2004. – 243 с. : ил., табл.; 27 см.; ISBN 966-542-144-1;
78. Письменный Е. Н., Кондратюк В. А., Жукова Ю. В., Терех А. М. Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб // ВЕЖПТ. – 2011. – №8 (50). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konvektivnyy-teploobmen-poperechno-omываемых-shahmatnyh-paketov-plosko-ovalnyh-trub> (дата обращения: 28.07.2025);
79. Пономарев, В.Б.; Фесун, И.П. Математическое моделирование скорости осаждения частиц с учетом динамической релаксации. Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54. – № 5. – С. 636–642;
80. Прасолов Г.С. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 236 с.;
81. Приказ Ростехнадзора от 25.03.2014 N 116 (ред. от 12.12.2017) Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасно-

- сти Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением;
- 82.Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Жаранов В.А., Герасимова О.В. Движение дисперсных материалов во вращающихся смесителях // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2018. – №3 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dvizhenie-dispersnyh-materialov-vo-vraschayuschih-smesitelyah> (дата обращения: 04.08.2024);
- 83.Романенко А. В Углеродные материалы и их физико-химические свойства / А.В. Романенко, П.А. Симонов; под общ. ред. д.т.н., проф. А.С. Носкова. – Москва : Калвис, 2007. – 109, [2] с. ил.; 22. – (Промышленный катализ в лекциях, Коллекция Издательства KVS); ISBN 978-5-89530-015-2, 5-89530-004-9;
- 84.Романков П.Г., Курочкина М.И. Гидромеханические процессы химической технологии. Изд. 2-е, пер. и доп. – Ленинград: Химия, 1974. – 288 с.;
- 85.Руднев Б. И., Повалихина О. В. Основные физико-химические свойства частиц дизельной сажи // Научные труды Дальрыбвтуза. – 2014. – Т. 33 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-fiziko-himicheskie-svoystva-chastits-dizelnoy-sazhi> (дата обращения: 10.01.2025);
- 86.СО 34.20.607-2005. Методические указания по формированию смет и калькуляций на ремонт энергооборудования. Часть 14 Очистка энергетического оборудования;
- 87.Соболев, А. А. Движение частиц в воздушном потоке / А. А. Соболев, П. А. Мельников, А. О. Тютюнник // Вектор науки ТГУ. – 2011. – №3.–С. 82–86.;
- 88.Страус, В. Промышленная очистка газов: пер. с англ. / В. Страус. М. : Химия, 1981. 616 с.;
- 89.Тепловой расчет котлов. (Нормативный метод). Издание 3-е, переработанное и дополненное. Издательство НПО ЦКТИ, СПб, 1998. – 256 с.: ил.;

90. Теснер П. А., “Образование сажи при горении”, Физика горения и взрыва, 15:2 (1979), 3–14; Combustion, Explosion and Shock Waves, 15:2 (1979), С. 111–120;
91. Тринченко А.А., Парамонов А.П., Кадыров М.Р.. Низкотемпературное вихревое сжигание как способ улучшения экологических показателей мощного котла // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т.23. – №3. – С.74–87. DOI: 10.18721/JEST.230307;
92. Федотовский В.С., Сабелев Г.И. К расчету распределения концентрации частиц в дисперсном потоке // Препринт ФЭИ Обнинск, 1975. –18 с.;
93. Фомичев А. С., Корецкий Д. А., Заворин А. С. Прогнозирование отложений угольной золы в топках энергетических котлов на основе численного моделирования // Известия ТПУ. – 2013. – №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prognozirovanie-otlozheniy-ugolnoy-zoly-v-topkakh-energeticheskikh-kotlov-na-osnove-chislennogo-modelirovaniya> (дата обращения: 11.08.2024);
94. Фролов В.В. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988, 559 с.: ил.;
95. Хондошко Ю.В. Проблемы сжигания твердого низкосортного топлива в котельных малой и средней мощности // Вестник Амурского государственного университета. Серия: Естественные и экономические науки. – 2020. – №89. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-szhiganiya-tverdogo-nizkosortnogo-topliva-v-kotelnyh-maloy-i-sredney-moschnosti> (дата обращения: 27.07.2024);
96. Цепилев И. А. Оптимальное управление рисками при эксплуатации паровых котлов высокого и сверхвысокого давления // Наука, техника и образование. – 2015. – №12 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimalnoe-upravlenie-riskami-pri-ekspluatatsii-parovyh-kotlov-vysokogo-i-sverhvyssokogo-davleniya> (дата обращения: 26.07.2024);

97. Чалганова А. А. Выполнение задачи однофакторного дисперсионного анализа с использованием табличного процессора Excel. Учебное пособие по дисциплине «Статистика» / А. А. Чалганова. – [Текст: электронный]. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2022. – 52 с.;
98. Шаблий, Л. С. Компьютерное моделирование типовых гидравлических и газодинамических процессов двигателей и энергетических установок в ANSYS Fluent [Электронный ресурс] : [учеб. пособие] / Л. С. Шаблий, А. В. Кривцов, Д. А. Колмакова; М-во образования и науки Рос. Федерации, Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева (Самар. ун-т). – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – on-line. – ISBN = 978-5-7883-1157-9;
99. Эпик И. П. Влияние минеральной части сланцев на условия работы котлоагрегата. – Таллин: ЭГИ, 1961. – 249 с;
100. Яковлев, В. А. Тепловой расчёт паровых и водогрейных котлов с камерными топками. Теплогенерирующие установки: учебное пособие / В. А. Яковлев, Е. А. Бирюзова. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 246 с.;
101. Ярмольчик Ю. П., Шрёгер Р., Хаберфельнер Х., Пихлер М., Костич Д., Мороз Г. В. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 2 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2020. – Т. 63. – № 6. – С. 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540>;
102. Abd-Elhady MS, Rindt CCM, Van Steenhoven AA (2011) Influence of the apex angle of cone-shaped tubes on particulate fouling of heat exchangers. Heat Transf Eng 32:272–281. <https://doi.org/10.1080/01457632.2010.495622>;
103. Akar G. Et Al., "Characterization of ash deposits from the boiler of Yenikoy coal-fired power plant, Turkey," INTERNATIONAL JOURNAL OF COAL GEOLOGY, vol.105, pp.85–90, 2013;
104. ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT Theory Guide. – U.S.A.: SAS IP, Inc. – 2011. – 794 p.;

105. ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT Tutorial Guide. – U.S.A.: SAS IP, Inc. – 2013. – 1146 p.;
106. ANSYS, Inc. Ansys Fluent Customization Manual Release 2025;
107. Awad, M. M. 2011. Fouling of heat transfer surfaces. Heat Transfer - Theoretical Analysis, Experimental Investigations and Industrial Systems, ed. A. Belmiloudi. 505–542. UK: IntechOpen Limited. <https://doi.org/10.5772/13696>;
108. Bashir, M. S., Jensen, P. A., Frandsen, F., Wedel, S., Dam-Johansen, K., Wadenbäck, J., & Pedersen, S. T. (2012). Suspension-Firing of Biomass: Part 1, Full-Scale Measurements of Ash Deposit Build-up. *Energy & Fuels*, 26, 2317–2330. <https://doi.org/10.1021/ef201680k>;
109. Coates, C.; Fowler, B.; Holst, G. Scientific Digital Cameras. Elimination of restrictions using sCMOS camera. *Photon-Russ.* 2016, 102–110, <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2016.58.4.102.110>.;
110. Cui, F.; Qin, S.; Zhang, J.; Li, M.; Shi, Y. A Hybrid Method for Prediction of Ash Fouling on Heat Transfer Surfaces. *Energies* 2022, 15, 4658. <https://doi.org/10.3390/en15134658>;
111. Fakourian, S., McAllister, Z., Fry, A., Wang, Y., Li, X., Wendt, J.O.L., Dai, J.. Modeling ash deposit growth rates for a wide range of solid fuels in a 100 kW combustor. *Fuel Processing Technology* 2021, 217, 106777. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106777>;
112. FURMAŃSKI, P. THERMAL AND RADIATIVE PROPERTIES OF ASH DEPOSITS ON HEAT TRANSFER SURFACES OF BOILERS. *Journal of Power Technologies*, [S.l.], v. 79, mar. 2011. ISSN 2083-4195. Available at: <<https://papers.itc.pw.edu.pl/index.php/JPT/article/view/145>>. Date accessed: 29 may 2025.;
113. Guo, Z., Li, N., Klemeš, J. J., Wang, Q., & Zeng, M. (2021). Mechanisms and strategies for ash deposition reduction in flue gas heat exchanger. *Clean Technologies and Environmental Policy*. doi:10.1007/s10098-021-02083-2;

114. Guo, Z.; Li, J.; Liang, Y.; Long, X.; Lu, X.; Zhang, D. A Numerical Simulation Study into the Effect of Longitudinal and Transverse Pitch on Deposition of Zhundong Coal Ash on Tube Bundles. *Processes* 2024, 12, 178. <https://doi.org/10.3390/pr12010178>;
115. Han Z., Yang X., Li J., Xu Z. A waste heat exchanger fly ash particle deposition model with dynamic mesh and random function method // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2022. Vol. 40. p. 102502.;
116. Hasson E. A., Ateeq A.A., Jabbar T.A. Numerical simulation of ash deposition on the surface of tubes bundle. (2022). *University of Thi-Qar Journal for Engineering Sciences*, 12(2), 1-9. <https://doi.org/10.31663/tqujes.12.2.443> (2022);
117. Houben, J. J. H. (2011). Experimental investigations and CFD simulations on particle depositions in gas cyclone separators. Ph. D. thesis, Montanuniversitaet Leoben.;
118. Jiang, L.-Y.; Trembath, P.; Patnaik, P.; Capurro, M. Environmental particle rebound/deposition modeling in engine hot sections. *Front. Mech. Eng.* 2023, 8, 924755.;
119. Kasper, R.; Turnow, J.; Kornev, N. Numerical modeling and simulation of particulate fouling of structured heat transfer surfaces using a multiphase Euler-Lagrange approach. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2017, 115, 932–945.;
120. Kleinhans, U., Wieland, C., Frandsen, F. J., & Spliethoff, H. (2018). Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior. *Progress in Energy and Combustion Science*, 68, 65-168. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.02.001>;
121. Konstandopoulos, A.G.: Particle sticking/rebound criteria at oblique impact. *J. Aerosol Sci.* 37(3), 292–305 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2005.05.019>;

122. Krishnamoorthy, G.; Bloom, E.; Viswanathan, K.; Patwardhan, S.S.; Stadem, D.J.; Benson, S. Measurements and Prediction of Ash Deposition in a Cyclone-Fired Boiler Operating under Variable Load Conditions. *Fluids* 2023, 8, 305. <https://doi.org/10.3390/fluids8120305>;
123. Lee B.E., Computational Prediction of Deposition and Erosion in Boiler Tube Banks. Ph.D. Thesis, University of New South Wales, Sydney, Australia (1997);
124. Lee, B. E., Fletcher, C. A. J., Shin, S. H., & Kwon, S. B. (2002). Computational study of fouling deposit due to surface-coated particles in coal-fired power utility boilers. *Fuel*, 81(15), 2001-2008. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00127-8](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00127-8);
125. Li, J., Du, W., Cheng, L., Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface, *Applied Thermal Engineering* (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.198>;
126. Li, P.; Li, K.; Zhou, Y.; Li, Q.; Shi, Z.; Zhong, W. An Effective Strategy for Monitoring Slagging Location and Severity on the Waterwall Surface in Operation Coal-Fired Boilers. *Energies* 2023, 16, 7925. <https://doi.org/10.3390/en16247925>;
127. Lin, F., Shen, Z., Liang, Q., Dai, Z., Xu, J., Liu, H. (2022). Comprehensive adhesion model based on the surface characteristics of the coal particles. *Fuel*. 315. 123219. [10.1016/j.fuel.2022.123219](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123219);
128. Marchioli C., Giusti A., Salvetti M.V., Soldati A. Direct Numerical Simulation of Particle Wall Transfer and Deposition in Upward Turbulent Pipe Flow // *Int. J. Multiphase Flow*. 2003. V. 29. P. 1017;
129. Mavridou SG, Bouris DG (2012) Numerical evaluation of a heat exchanger with inline tubes of different size for reduced fouling rates. *Int J Heat Mass Transf* 55:5185–5195. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.020>;

130. Mensch A.E., Cleary T.G. Measurements and predictions of thermophoretic soot deposition. *Int J Heat Mass Transf.* 2019;143:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118444. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118444. PMID: 32116345; PMCID: PMC7047755.;
131. Mills, K. C., Keene, B. J., (1987) Physical properties of BOS slags, *International Materials Reviews*, 32:1, 1–120, DOI: 10.1179/095066087790150296;
132. Mu L., Miao H., Zhao C., Zhai Z., Shang Y., Yin H. Dynamic CFD modeling evaluation of ash deposition behavior and morphology evolution with different tube arrangements // *Powder Technology*. 2021. Vol. 379. pp. 279–295;
133. Nazari, S. (2020). Modelling of biomass combustion and ash deposition in an 88 MW grate-fired boiler. Master thesis, Aalborg University;
134. Nybu, S. L. (2022) Numerical simulations of fluid flow and particle deposition in a cascade impactor. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology;
135. Ots, A. Thermophysical properties of ash deposit on boiler heat exchange surfaces. pp. 150–55 *Proceedings of International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, Greece, 2011;
136. Pan, Y., et al., An Integrated Theoretical Fouling Model for Convective Heating Surfaces in Coal-fired Boilers, *Powder Technology*, 210 (2011), 2, pp. 150–156;
137. Park, J., Kim, O.J., Kim, S., & Shin, Y. (2015). Heat transfer characteristics of circular and elliptic cylinders in cross flow. *Advances in Mechanical Engineering*, 7;
138. Pérez, M.G., Vakkilainen, E. CFD model for prediction of initial fume deposition rates in the superheater area of a Kraft Recovery Boiler E. *PROCEEDINGS OF ECOS 2014 - THE 27TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEMS JUNE 15-19, 2014, TURKU, FINLAND*;

139. Scharler R., Kuerten J. G. M., Schulze K., Obernberger I., Numerical simulation of ash particle impaction in tube bundles a case study as a basis for a CFD based ash deposit formation model in convective heat exchangers, VDI BERICHTE 1988 (2007) 299–312;
140. Scheinherr, A. Glottal motion and its impact on airflow and aerosol deposition in upper airways during human breathing. Fluids mechanics [physics.class-ph]. Ecole Centrale Marseille, 2015. English. NNT: 2015ECDM0001. tel-01169649;
141. Schulze, K., Hofmeister, G., Jöller, M., Scharler, R., Obernberger, I., Korbee, R., & Cieplik, M. (2007). Development and evaluation of a flexible model for CFD simulation of ash deposit formation in biomass fired boilers. In *Proceedings: Impacts of Fuel Quality on Power Production* (pp. 7–95–7–113). Electric Power Research Institute, Inc.;
142. Senior, C. L., Srinivasachar S. Viscosity of Ash Particles in Combustion Systems for Prediction of Particle Sticking. *Energy & Fuels* 1995 9 (2), 277–283;
143. Stordal, T.V. (2021) Particle Deposition From Geothermal Supercritical Steam. Master thesis, Norwegian University of Science and Technology;
144. Strandstrom, K., Mueller, C., & Hupa, M. (2007). Development of an ash particle deposition model considering build-up and removal mechanisms. *Fuel Processing Technology*, 88(11-12), 1053–1060. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.06.024>;
145. Tian Y., Yang X., Ma L., Ingham D., Pourkashanian M. (2024) Understanding the effects of mesh smoothing methods in the CFD modelling of Zhundong lignite ash deposition. *Fuel*, 364, 131077-131077;
146. Tian Y. (2022). A dynamic mesh approach to the 2D CFD modelling of ash deposition in solid fuel combustion. A thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Philosophy, University of Sheffield;
147. Waclawiak K., Kalisz S., 2014. Influence of selected parameters on ash particle trajectories when modelling deposition on superheater tubes in pulverised

- coal boilers using Fluent code. *Chem. Process Eng.*, 35, 305–316. DOI: 10.2478/cpe-2014-0023;
148. Wagoner CL, Yan XX. Ash impaction changes the shape of a superheater deposit with time. *The Impact of Ash Deposition on Coal-Fired Power Plants*, Proc. United Engineering Foundation International Conference, Birmingham, UK; 1993;
149. Walmsley TG, Walmsley MRW, Atkins MJ, Hoffman-Vocke J, Neale JR (2012) Numerical performance comparison of different tube cross-sections for heat recovery from particle-laden exhaust gas streams. *Procedia Eng* 42:1351–1364. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.527>;
150. Wang, X. (2022). *Mineral Particle Deposition in High Temperature Processes*. Danmarks Tekniske Universitet (DTU);
151. Xu, Z., Li, J., & Han, Z. (2021). Numerical study of particle fouling deposition on heat transfer surface. *Energy Storage and Saving*. 1. 10.1016/j.enss.2021.11.001;
152. Yang, X., Ingham, D., Ma, L., Troiano, M., Pourkashanian, M. Prediction of particle sticking efficiency for fly ash deposition at high temperatures, *Proc. Combust. Inst.* 37 (2019) 2995–3003, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.038>;
153. Yang, X., Ingham, D., Ma, L. et al. (2 more authors) (2017) Understanding the ash deposition formation in Zhundong lignite combustion through dynamic CFD modelling analysis. *Fuel*, 194. pp. 533–543. ISSN 1873-7153;
154. Yang, X., Zhou, H., & Wu, H. (2022). CFD modelling of biomass ash deposition under multiple operation conditions using a 2D mass-conserving dynamic mesh approach. *Fuel*, 316, Article 123250;
155. Yang, X. (2017) *Development of Ash Deposition Prediction Models through the CFD Methods and the Ash Deposition Indices*. PhD thesis, University of Sheffield;

156. Zhang, Y., Li, Q., Zhou, H. (2016). Effects of Ash Deposition and Slagging on Heat Transfer. 10.1016/B978-0-12-800966-6.00006-5;
157. Zheng, Z.; Yang, W.; Cai, Y.; Wang, Q.; Zeng, G. Dynamic simulation on ash deposition and heat transfer behavior on a staggered tube bundle under high-temperature conditions. *Energy* 2020, 190, 116390;
158. Zheng, Z., Yang, W., Yu, P., Cai, Y., Zhou, H., Boon, S.K., Subbaiah, P. Simulating growth of ash deposit in boiler heat exchanger tube based on CFD dynamic mesh technique, *Fuel* 259 (September 2019) (2020) 116083, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116083>.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Приложение А – Результаты исследований толщины натрубных
отложений в конвективных пакетах котлов КВу-1,0**

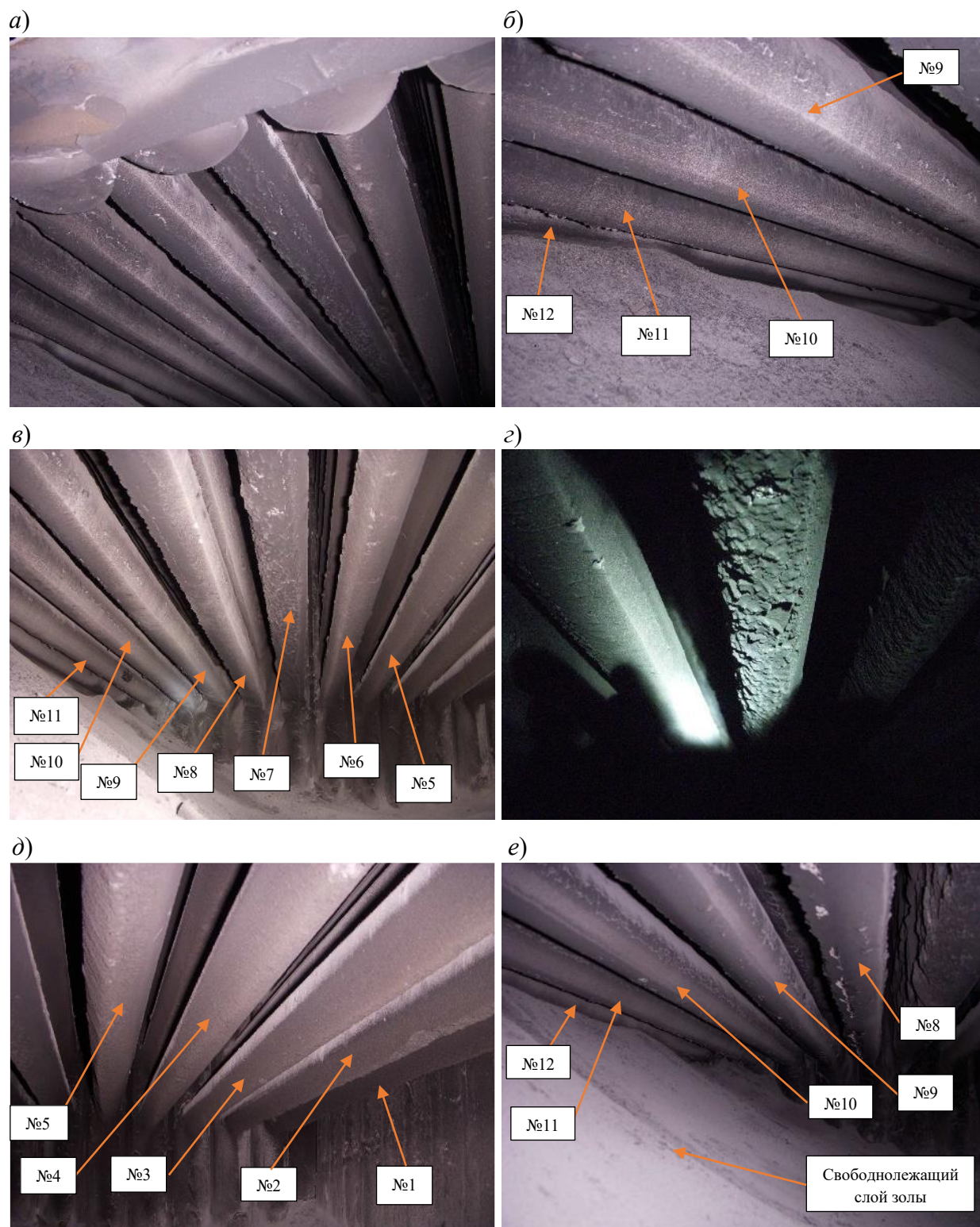


Рис. 1. Изображения нижнего ряда труб секций конвективных пакетов у котла КВу-1,0: а) – выход конвективных труб из стояков у котла №1; б) – трубы №9–12 котла №1; в) – трубы №5–11 котла №1; г) – труба №6 (подробно) котла №1; д) – трубки №8–12 котла №1; е) – трубки №8–12 котла №2

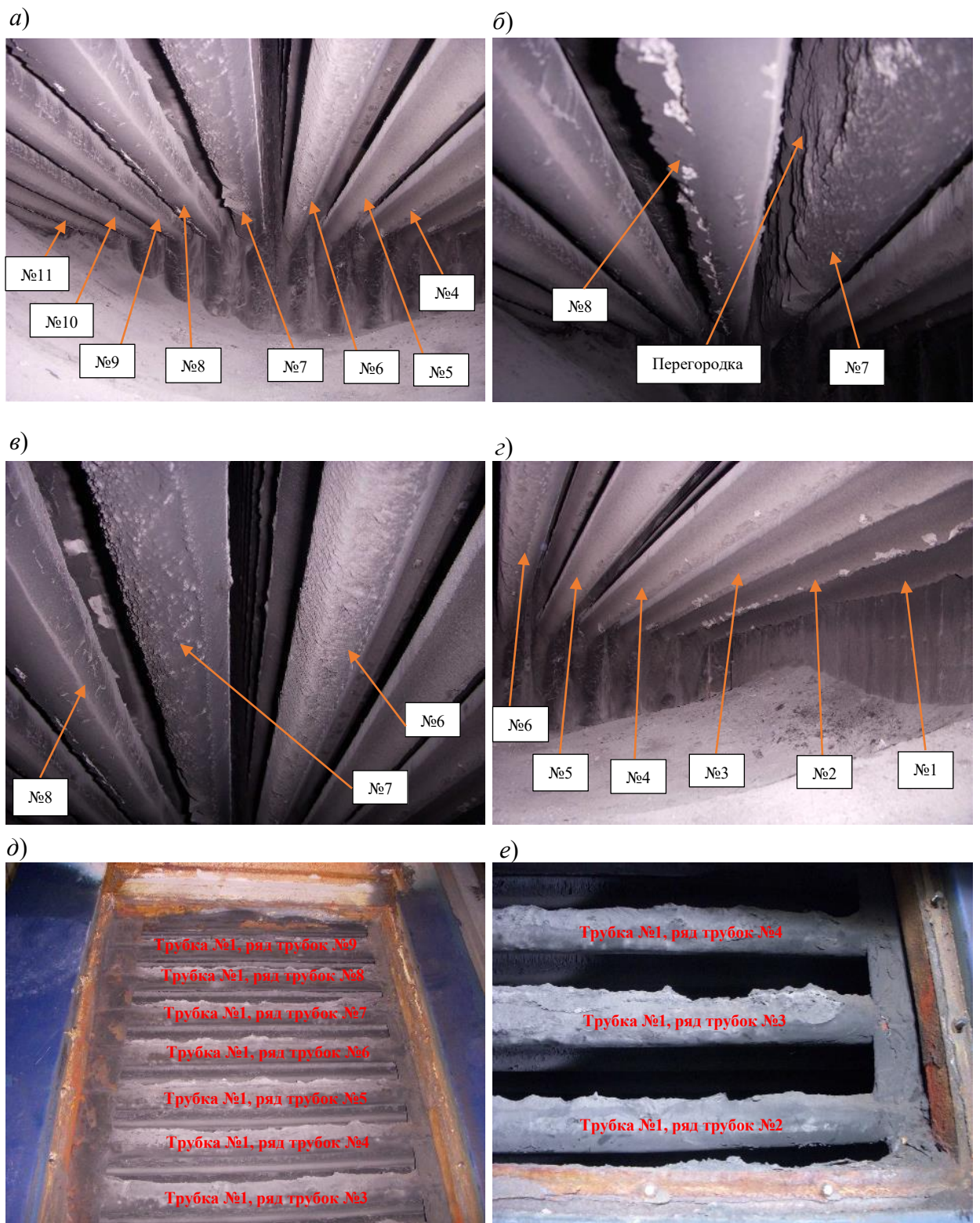


Рис. 2. Изображения нижнего ряда труб секции конвективных пакетов у котла КВу-1,0: а) – трубы №4–11 котла №2; б) – трубы №5–6 и перегородка котла №2; в) – трубы №6–8 котла №2; г) – трубы №1–6 котла №2; д) – трубы №1 рядов №3–9 котла №2; е) – трубы №1 рядов №2–4 котла №2

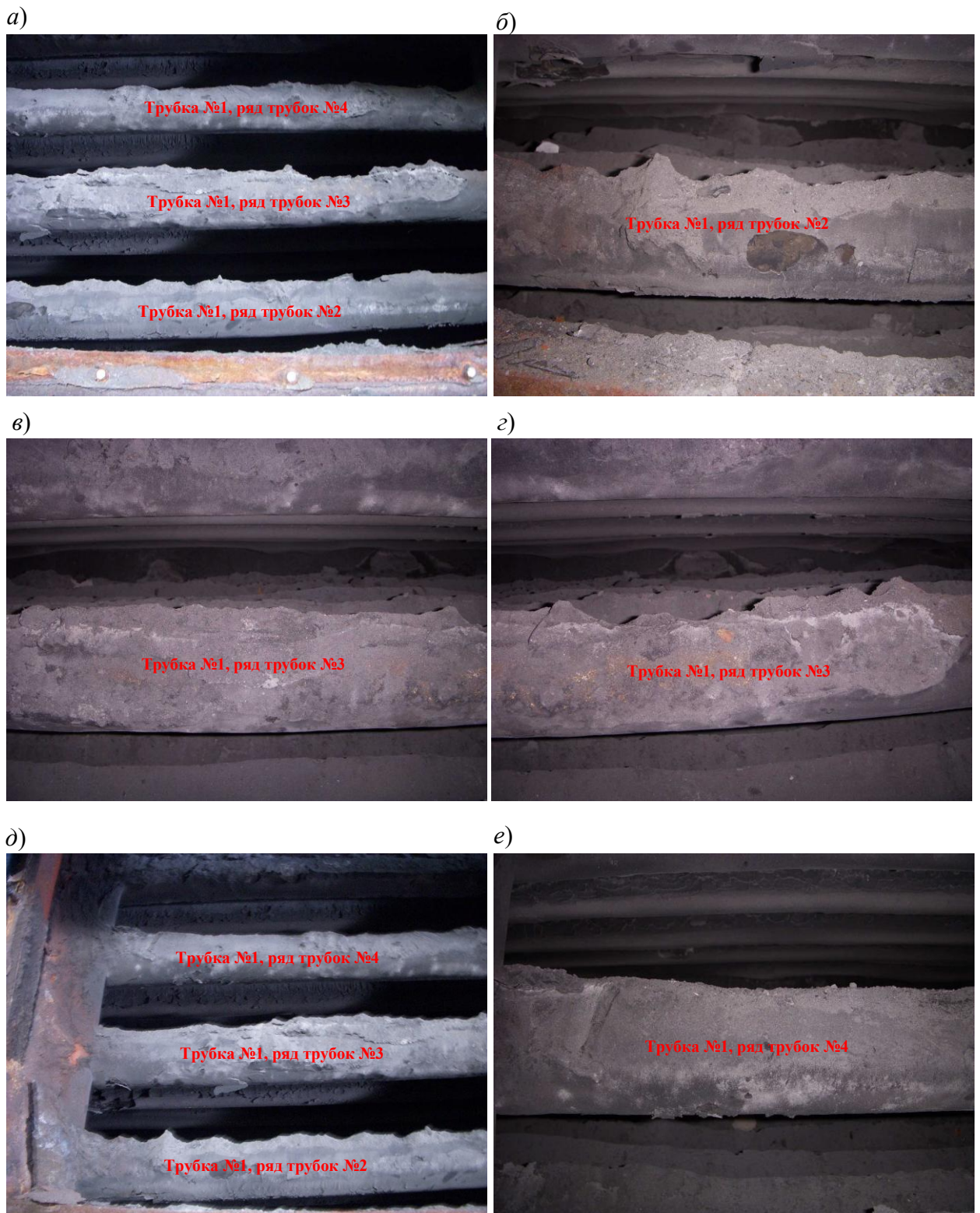


Рис. 3. Изображения труб секций конвективных пакетов у котла КВу-1,0: а) – трубы №1 рядов №2–4 котла №2; б) – труба №1 ряда №2 (подробно) на расстоянии 760 мм от правого стояка секции конвективного пакета котла №2; в) – центральная часть (подробно) труб №1 ряда №3 котла №2; г) – правая сторона (подробно) труб №1 ряда №3 котла №2; д) – левая сторона труб №1 рядов №2-4 котла №2; е) – левая сторона трубы №1 ряда №4 котла №2

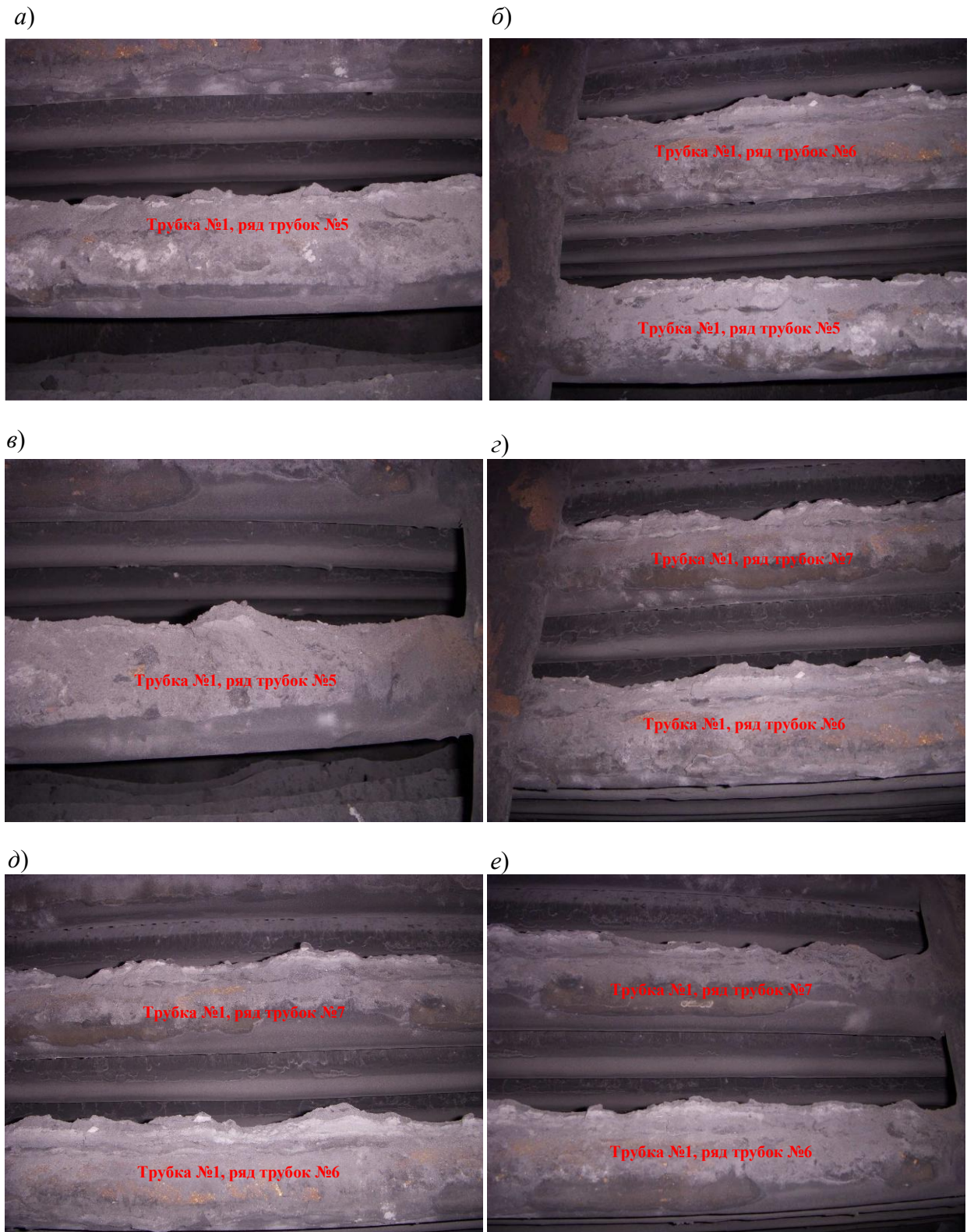


Рис. 4. Изображения труб секции конвективных пакетов у котла КВу-1,0: а) – центральная часть трубы №1 ряда №5 котла №2; б) – левая сторона труб №1 рядов №5–6 котла №2; в) – правая сторона трубы №1 ряда №5 котла №2; г) – левая часть труб №1 рядов №6–7 котла №2; д) – центральная часть труб №1 рядов №6–7 котла №2; е) – правая сторона труб №1 рядов №6–7 котла №2

а)



б)



Рис. 5. Изображения: а) – левая сторона труб №1 рядов №7–9 конвективных пакетов котла КВу-1,0 №2; б) – нижние трубы конвективного пакета котла КВ-ГМ-2,0 (вид из зольника)

Приложение Б – Результаты численного моделирования натрубных отложений в сечении конвективных пакетов для котла КВу–1,0

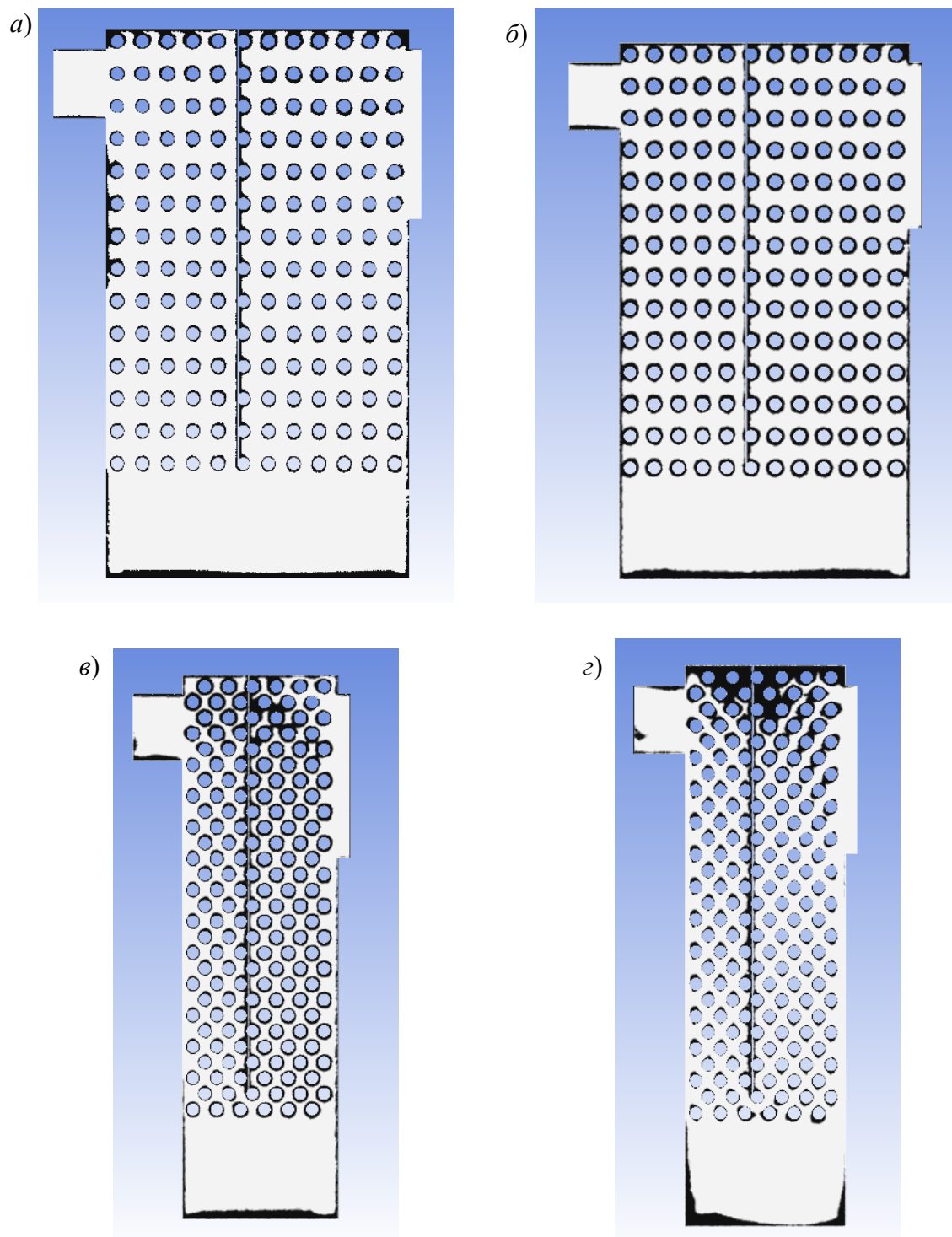


Рис. 1. Слои натрубных отложений в конвективном пакете: а) – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$; б) – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$; в) – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$; з) – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$

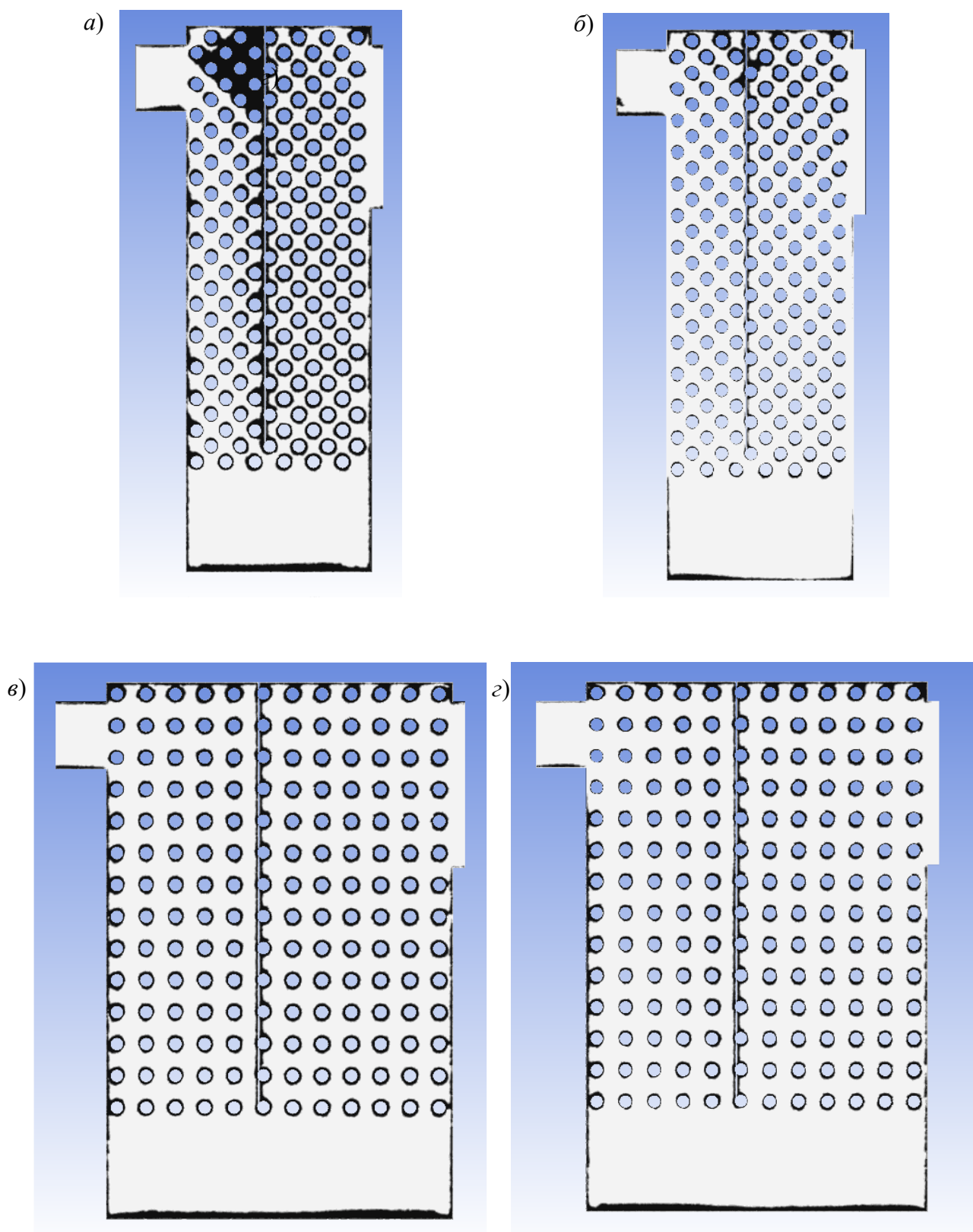


Рис. 2. Слой натрубных отложений в конвективном пакете: *а)* – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$; *б)* – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$; *в)* – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$; *г)* – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$

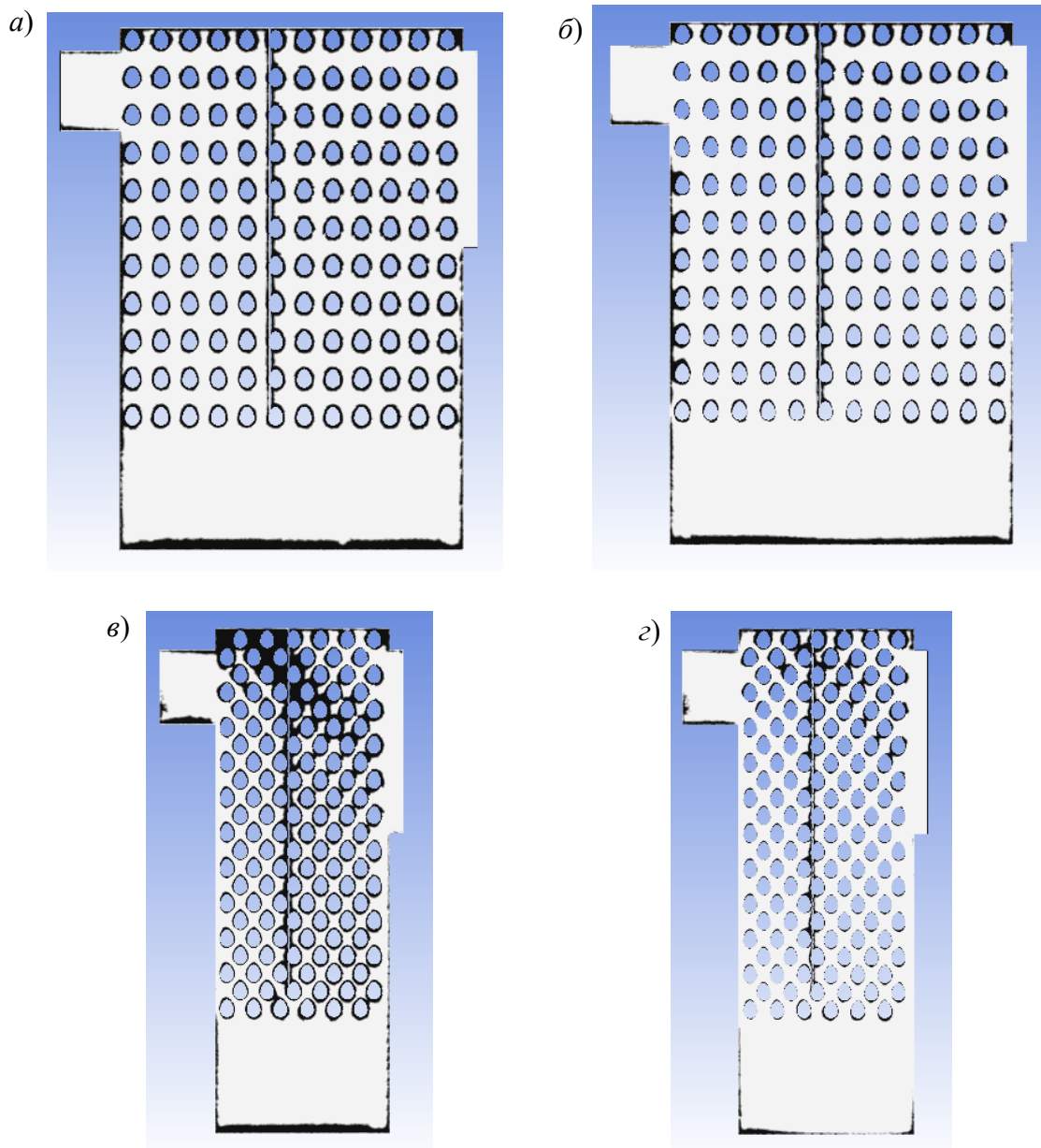


Рис. 3. Слой натрубных отложений в конвективном пакете: а) – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$; б) – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$; в) – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$; з) – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 1,98$

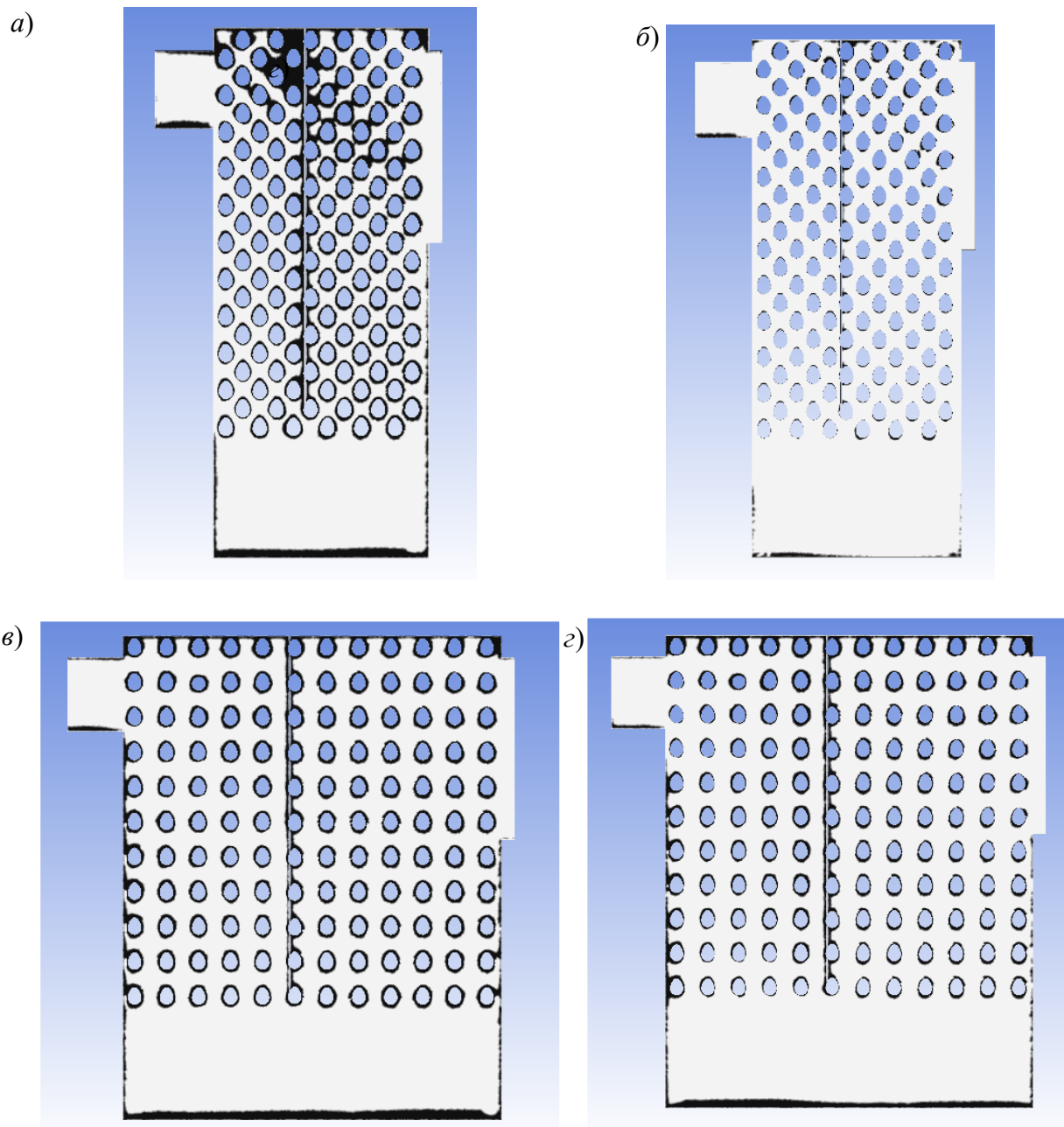


Рис. 4. Слой натрубных отложений в конвективном пакете: а) – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$; б) – шахматный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$; в) – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,091$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$; г) – коридорный пучок, $G_{п.с} = 0,297$ кг/с, $\sigma_1 = 2,38$

**Приложение В – Результаты теплового расчета конвективных
поверхностей нагрева котла КВу–1,0**

Таблица 1 – Сводная таблица расчетов теплового баланса для котла КВу-1,0

Физическая величина	Обозначение	Значение при расчете по нормативному методу	Значение при расчете по усовершенствованной методике	Единицы измерения
1	2	3	4	5
Процент потерь теплоты с химическим недожогом топлива	q_3	0	0	%
Процент потерь теплоты через наружные ограждения котлоагрегата при номинальной нагрузке)	q_5 ном	1,5	1,5	%
Количество теплоты, вносимое в топку с топливом	Q_T	31,28	31,28	кДж/кг
Количество теплоты, вносимое в топку с воздухом	$Q_{вн.в}$	0	0	кДж/кг
Располагаемая теплота, вносимая в топку котлоагрегата	Q_p^p	23 061	23 061	кДж/кг
Температура уходящих газов	$t_{у.г}$	184,8	451,5	°С
Энтальпия уходящих газов	$I_{у.г}$	2440	6170	кДж/кг
Энтальпия присасываемого окружающего воздуха	$I_{о.с}$	183,36	183,36	кДж/кг
Потери теплоты с уходящими газами	Q_2	2323	5997	кДж/кг
Процент потерь теплоты с уходящими газами	q_2	10,07	26,01	%
Потери теплоты с химическим недожогом топлива	Q_3	0	0	кДж/кг
Процент потерь теплоты через наружные ограждения котлоагрегата	q_5	1,5	1,5	%
Потери теплоты через наружные ограждения котлоагрегата	Q_5	345,92	345,92	кДж/кг
Коэффициент полезного действия (брутто) котлоагрегата	$\eta_{бр}$	88,43	72,49	%
Потери теплоты в котлоагрегате	$Q_{пот}$	2669	6343	кДж/кг
Полезно использованная теплота	Q_1	3 420 000	3 420 000	кДж/ч
Расчётный часовой расход топлива	B_p	167,7	204,6	кг/ч

Средняя теплоёмкость нагреваемого теплоносителя в котлоагрегате	c^{cp}_2	4,19	4,19	кДж/кг °С
Расход нагреваемого теплоносителя	G_2	37 090	37 090	кг/ч
Коэффициент сохранения теплоты	φ	0,983	0,980	

**Таблица 2 – Сводная таблица теплового расчета секции
I конвективной поверхности нагрева котла КВу-1,0**

Физическая величина	Обозначение	Значение при расчете по нормативному методу	Значение при расчете по усовершенствованной методике	Единицы измерения
1	2	3	4	5
Коэффициент тепловой эффективности поверхности нагрева	ψ	0,65	0,206	
Коэффициент загрязнения конвективных труб	ε	0,00139	0,0112	м ² ·ч·°С/кДж
Энтальпия продуктов сгорания на выходе из конвективного пакета	$I_{пс}$	3952	8073	кДж/м ³
Тепловосприятие конвективного пакета по балансу	Q_6	7123,4	3923,5	кДж/м ³
Приращение энтальпии теплоносителя в конвективном пакете	$\Delta I_{кп1}$	32,21	21,64	кДж/кг
Температура нагреваемого теплоносителя на выходе из конвективного пакета	t_2	90,25	90,25	°С
Среднелогарифмический температурный напор	Δt_{cp}	410,65	624,63	°С
Средняя температура продуктов сгорания в конвективном пакете	$t^{cp}_{пс}$	551,5	724,9	°С
Средняя скорость продуктов сгорания в межтрубных каналах конвективного пакета	$w^{cp}_{пс}$	1,35	1,99	м/с
Критерий Рейнольдса продуктов сгорания	Re	5139	5514	
Критерий Прандтля продуктов сгорания	Pr	0,615	0,599	
Коэффициент конвективной теплоотдачи	α_k	231,1	290,3	кДж/м ² ·ч·°С
Коэффициент ослабления лучей трёхтомными газами	k_r	6,18	5,34	1/м·МПа
Оптическая толщина излучающего слоя	k_{ps}	0,148	0,128	1/м·МПа

Эффективная степень черноты несветящихся компонентов излучающего газа	$a_{н.св}$	0,138	0,120	
Средняя температура загрязнённой поверхности стенки	$t_{ср_3}$	178	582,26	°С
Коэффициент теплоотдачи излучением	$\alpha_{л}$	28,7	71,2	кДж/м ² ·ч·°С
Коэффициент теплопередачи	k	160,44	70,86	кДж/м ² ·ч·°С
Тепловосприятие конвективного пакета по уравнению теплопередачи	$Q_{т}$	87 123	3923,49	кДж/м ³
Температура на выходе из конвективного пакета (контрольная величина)	$t_{пс}$	298,8	587,9	°С
Удельное количество теплоты, передаваемое конвективными поверхностям нагрева	$q_{кп1}$	65 884	44 264	кДж/ч·м ³

Приложение Г – Листинг программного кода математической модели, описывающей физические принципы формирования натрубных отложений, реализованного в функциях *UDF* для численного моделирования работы конвективного пакета в *ANSYS Fluent*

```
#include "udf.h"
#include "dpm.h"
#define Restitution 0.9
#define E_G_star 2.1
#define Beta 0.09
#define mu_star 0.2
#define SiO2 52.9
#define Al2O3 12.9
#define Fe2O3 6.8
#define CaO 9.0
#define MgO 1.9
#define K2O 2.0
#define Na2O 0.8
#define P2O5 2.4
#define SiO2_mole 0.673
#define Al2O3_mole 0.097
#define Fe2O3_mole 0.032
#define CaO_mole 0.123
#define MgO_mole 0.036
#define K2O_mole 0.016
#define Na2O_mole 0.01
#define P2O5_mole 0.013
#define density_p 750
#define lenght_cell 0.0007536
#define width_cell 1
```

```

DEFINE_DPM_BC(particle_reflect_stick,tp,t,f,f_normal,dim)
{
    cell_t c;
    Thread *tc;

    real alpha;           // angle of particle path with face normal
    real vn = 0.0;       // normal velocity
    real normal[3];
    real area[3];
    real mass;

    real nu, u_cr, alpha_cr, W_a, E_ERE, csi, We_p, surface_tension, Re_p, visc_p, ef, z, ce, vmag,
    visc_p_crit;

    real NBO_T, alph, bet, delt, k_s, k_p, H, dm, contact_angle, alphakoeffteplootdachi1, alphakoeffteplootdachi2, F1, F2, Rewater, Nusseltwater, Prwater, Prwaterstenki;

    real At;
    int i, idim = dim;
    for (i=0; i<idim; i++)
        normal[i] = f_normal[i];
    /* Compute normal velocity */
    for (i=0; i<idim; i++)
        vn += TP_VEL(tp)[i]*normal[i];
    /* Compute particle incident angle */
    alpha = M_PI/2. - acos(MAX(-
1.,MIN(1.,NV_DOT(normal,TP_VEL(tp))/MAX(NV_MAG(TP_VEL(tp)),DPM_SMALL))));
    /* Compute constant K, critical velocity u_cr, and critical angle alpha_cr */
    if (TP_T(tp) < 1073.15)
    {
        visc_p = pow(10,15);
    }
    else
    {
        NBO_T = (CaO_mole+MgO_mole+Na2O_mole+K2O_mole-Al2O3_mole-
Fe2O3_mole)/(SiO2_mole/2+Al2O3_mole+Fe2O3_mole);
        delt = CaO_mole/(CaO_mole+Al2O3_mole);
    }
}

```

```

bet = 24431.69*delt-7563.46-17685.4*pow(delt,2)+32644.26*CaO_mole-
103681*CaO_mole*delt+74541.33*CaO_mole*pow(delt,2)-
46484.8*pow(CaO_mole,2)+146008.4*pow(CaO_mole,2)*delt-
104306.0*pow(CaO_mole,2)*pow(delt,2)+21904.63*pow(CaO_mole,3)-
68194.8*pow(CaO_mole,3)*delt+48429.31*pow(CaO_mole,3)*pow(delt,2);

alph = 9.223-0.902473*bet-37*NBO_T;

visc_p = 0.1*TP_T(tp)*pow(10,(alph+(pow(10,3)*bet)/TP_T(tp)));

}

if (TP_T(tp) < 1273.15)
{
surface_tension = 1.0;
}

else
{
surface_tension = (SiO2/100*(0.29+(0.004/1000)*(-
1573.15+TP_T(tp))))+(Al2O3/100*(0.58+(0.004/1000)*(-
1573.15+TP_T(tp))))+(CaO/100*(0.51+(0.004/1000)*(-
1573.15+TP_T(tp))))+(MgO/100*(0.52+(0.004/1000)*(-
1573.15+TP_T(tp))))+(K2O/100*(0.01+(0.004/1000)*(1373.15-
TP_T(tp))))+(Na2O/100*(0.295+(0.004/1000)*(1373.15-TP_T(tp))));
}

alpha_cr = atan(1/(mu_star*E_G_star/pow(32*Beta*Beta*Beta,0.5)));

k_s = (1-pow(0.29,2))/(3.14*2.1*pow(10,11));

k_p = (1-pow(0.17,2))/(3.14*7.5*pow(10,10));

H = 0.51 * pow((5.0 * M_PI * M_PI * (k_s + k_p)) / (4.0 * pow(TP_RHO(tp), 1.5)), 0.4);

u_cr = pow((H*(1+pow((1/tan(alpha)),2)))/(TP_DIAM(tp)/2*pow(Restitution,2)),10.0/7.0);

vmag = MAX(NV_MAG(TP_VEL(tp)),DPM_SMALL);

We_p = (TP_RHO(tp)*pow(vn,2)*TP_DIAM(tp))/surface_tension;

dm = 1+0.259*pow(We_p,0.317);

contact_angle = 180/(1+exp(((TP_T(tp)-273.15)-930)/100));

E_ERE = 1/4*pow(dm,2)*(1-cos(contact_angle))+2/(3*dm)-0.00536*pow(dm,4.70)*pow((1-cos(con-
tact_angle)),0.591)-1;

visc_p_crit = pow(10,5);

if ((vn < u_cr && alpha > alpha_cr) || (E_ERE < 0) || (visc_p < visc_p_crit))
{

```

```

/* Deposition Model */
// Get the adjacent cell and its thread
c = F_CO(f, t);
tc = F_CO_THREAD(f, t);
F_AREA(area,f,t);
At = NV_MAG(area);
// Get mass of the particle parcel
mass = TP_MASS(tp);
// Save the deposited particles mass in a cell-based UDMI
C_UDMI(c, tc, 0) += mass; // Instantaneous amount of deposited mass on face
C_UDMI(c, tc, 1) = mass/(density_p*lenght_cell*width_cell);
return PATH_END;
}
else
{
/* Subtract off normal velocity */
for (i=0; i<idim; i++)
    TP_VEL(tp) [i] -= vn*normal[i];
/* Add reflected normal velocity */
for (i=0; i<idim; i++)
    TP_VEL(tp)[i] -= vn*normal[i];
/* Store new velocity in TP_VELO of particle */
for(i=0; i<idim; i++)
    TP_VELO(tp)[i] = TP_VEL(tp)[i];
return PATH_ACTIVE;
}
}
DEFINE_GRID_MOTION(grid_growth_1, domain, dt, time, dtime)
{
Thread *tf = DT_THREAD(dt);
face_t f;
cell_t c;

```

```

Thread *tc;

Node *v;

real x1, y1, x_new, y_new, theta;

int n;

SET_DEFORMING_THREAD_FLAG(THREAD_T0(tf));

begin_f_loop(f, tf)
{
    if PRINCIPAL_FACE_P(f,tf)
    {
        c = F_CO(f, tf);
        tc = F_CO_THREAD(f, tf);
        f_node_loop(f, tf, n)
        {
            v = F_NODE(f, tf, n);
            if (C_UDMI(c, tc, 0) > 0 && NODE_POS_NEED_UPDATE(v))
            {
                NODE_POS_UPDATED(v);
                x1 = NODE_X(v);
                y1 = NODE_Y(v);
                theta = atan2(y1, x1);
                x_new = x1 + (C_UDMI(c, tc, 0)/(density_p*lenght_cell*width_cell)) * cos(theta);
                y_new = y1 + (C_UDMI(c, tc, 0)/(density_p*lenght_cell*width_cell)) * sin(theta);
                NODE_X(v) = x_new;
                NODE_Y(v) = y_new;
            }
            C_UDMI(c, tc, 0) = 0.0;
        }
    }
}

end_f_loop(f, tf);
}

```

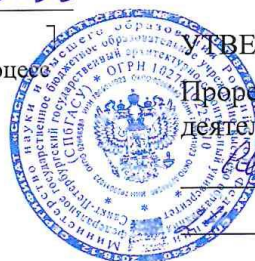
Приложение Д – Акты внедрения результатов научных исследований



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)
ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

24.06.2026 № 2А-ОД-06

о внедрении научных результатов
диссертации в образовательный процесс



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной
деятельности

С.В. Михайлов

июня 2026 г.

АКТ

о внедрении научных результатов диссертации в образовательный процесс

На основании решения Учебно-методической комиссии факультета инженерной экологии и городского хозяйства (Протокол от 19.06.2026 №9) научные результаты диссертации «Оценка эффективности теплообмена конвективных пакетов котлов в условиях запыленного потока» на соискание ученой степени кандидата технических наук Каштанова Дмитрия Ивановича, аспиранта кафедры теплогазоснабжения и вентиляции: полученные математические модели физических основ процессов осаждения сажи и золы в конвективных пакетах водотрубных котлов; методика расчёта для коэффициентов загрязнения, используемая в тепловом расчёте котлов – внедрены в образовательный процесс обучающихся по основным профессиональным образовательным программам 08.03.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция; 08.04.01 Строительство, профиль Теплогазоснабжение и вентиляция; 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника; 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника.

Председатель
учебно-методической комиссии

Д.В. Ульрих

Секретарь
учебно-методической комиссии

М.Н. Брюхов

СОГЛАСОВАНО

Начальник УМУ

Е.Б. Александрова

Начальник УНР

М.В. Аверина



ООО «БАЛТКОТЛОМАШ»
ИНН 4703124198 КПП 470301001 БИК 044030826
ОГРН 1114703005427 ОКАТО 41212842001
р/с 40702810600000001016
к/р 30101810900000000826
ОАО БАНК «Объединенный капитал»
г. Санкт-Петербург
Адрес: 188641, Ленинградская область,
Всеволожский район, г. Всеволожск,
пр. Христиновский, д.83, к. 2, помещ.14-Н, офис 13
тел.: (812) 560-38-30; т./ф: 560-10-87

Исх. № 76 от 26.05.2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов диссертационной работы аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Каштанова Дмитрия Ивановича, «**Оценка эффективности теплообмена конвективных пакетов котлов в условиях запыленного потока**».

Основные результаты работы – уточненная инженерная методика теплового расчета конвективных пакетов с вычислением коэффициента загрязнения по полученным зависимостям была использована при выполнении поверочного расчета конвективного пакета твердотопливного водотрубного котла КВу-1,0 при его модернизации компанией **ООО «БАЛТКОТЛОМАШ»**.

Генеральный директор



В.Ю. Безруких

ООО «ТЕПЛОМЕХАНИКА»
ООО «ТЕМ»



«ТЕПЛОМЕХАНИКА»
LLC

ТЕПЛОМЕХАНИКА

Россия, 191123, город Санкт-Петербург, Кирочная ул. д. 23 литера А, помещ. 9-н, офис № 8-1
р/с 40702810832330004086 в филиале «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ» АО «АЛЬФА-БАНК»
к/с 3010181060000000786 БИК 044030786 ИНН 7842221331 КПП 781101001 ОГРН 1247800027200

Исх. № от 25.05.26 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов диссертационной работы аспиранта Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета Каштанова Дмитрия Ивановича, «**Оценка эффективности теплообмена конвективных пакетов котлов в условиях запыленного потока**».

Основные результаты работы – уточненная инженерная методика теплового расчета конвективных пакетов с вычислением коэффициента загрязнения по полученным зависимостям была использована при выполнении конструктивных расчетов поверхностей нагрева разрабатываемых компанией **ООО «Тепломеханика»** линейки твердотопливных водотрубных котлов малой мощности – от 0,1 до 2 МВт тепловой мощности.

Генеральный директор

ООО «ТЕМ»



Чепкин А.М.