

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: **Яковлев Виктор Александрович**,  
кандидат технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: **Кочев Алексей Геннадьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный  
архитектурно-строительный университет»,  
кафедра «Теплогазоснабжение», заведующий;

**Рамазанов Рафшан Салманович**,  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова»,  
кафедра теплогазоснабжения и вентиляции,  
доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет».**

Защита диссертации состоится «29» сентября 2026 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, ауд. 220.

Тел./факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kashtanov-dmitriy-ivanovich>

Автореферат диссертации разослан «16» июля 2026 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



В.А. Пухкал

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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 теплопотерь 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.

**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.

**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 теплообменников, 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 теплообменников, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

**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.

**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.

**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.

*Во введении* представлена информация об актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, определены предмет и объект исследования.

*В первой главе* представлены факторы неудовлетворительной работы котлов, физико-химические характеристики сажистых и золовых частиц, а также сформировавшихся натрубных отложений.

*Во второй главе* представлен физико-математический анализ взаимодействия твердых частиц с поверхностями нагрева. Рассмотрены математические модели формирования натрубных отложений.

*В третьей главе* представлено описание планирования натурного и численного экспериментов по исследованию толщины натрубных отложений, а также постановка задачи численного моделирования.

*В четвертой главе* представлен анализ результатов экспериментального исследования натрубных отложений, полученных с помощью разработанных методов планирования эксперимента. Отражены новые физические зависимости толщины натрубных отложений от местоположения поверхности осаждения конвективного пакета в пространстве, а также зависимости влияния конструкции конвективных пакетов и режимного параметра работы котлов на коэффициенты загрязнения.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

### 1. Оценка влияния физических факторов на активность процессов образования слоев сажистых и золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных пакетов.

В результате физико-химических превращений компонентов топлива, обусловленных термическим воздействием на структуру органического вещества при горении, происходит образование сажи и золы – загрязняющих веществ, способных осаждаться на теплообменных поверхностях в конвективных пакетах котлов, приводя к снижению активности теплообменных процессов и КПД котлоагрегатов.

Активность процессов формирования натрубных отложений зависит от физико-химических характеристик частиц и тепловых условий работы конвективных пакетов. Зольность рабочего топлива  $A^p$ , а также условия его сжигания влияют на активность роста слоя натрубных отложений и его теплофизические характеристики.

В процессе проведения экспериментального анализа установлены основные физические факторы, влияющие на активность процессов формирования слоёв сажистых и золовых отложений при работе оборудования:

1. На поверхности труб преимущественно происходит осаждение частиц золы только мелких фракции (до 10 мкм). В связи с этим в некоторых исследованиях принята условная граница, равная размеру частиц в 30 мкм, которая устанавливает, что частицы с размерами  $> 30$  мкм преимущественно участвуют в разрушении поверхности слоя образовавшихся отложений, а частицы с размером  $< 30$  мкм преимущественно осаждаются на поверхности труб;

2. Конденсация неорганических паров на чистых поверхностях трубок в начальный момент времени работы котла приводит к возникновению тонкой липкой пленки, способствующей активному процессу осаждения частиц, однако количество частиц захваченной плёнкой не превышает 0,1 % массы золовых отложений;

3. При скоростях движения потока менее 2,5 м/с происходит ускорение роста натрубных отложений. Увеличение скорости потока способствует резкому снижению активности образования натрубных отложений. Частицы, обладающие более высокой кинетической энергией, повышают как вероятность их отскока при взаимодействии с поверхностью, так и выбивание с поверхности части уже осевших частиц, при этом проявляется эффект самоочистки;

4. Шахматный порядок размещения труб в пучке снижает интенсивность образования отложений из-за присутствия стабильной активности турбулентных течений;

5. Уменьшение диаметра труб в пучке приводит к снижению активности процессов осаждения, что объясняется влиянием радиуса кривизны поверхности на увеличение центробежной силы, действующей на частицы, которая начинает доминировать над действием сил притяжения к трубке. Увеличение  $\sigma_1$  не оказывает заметного влияния на активность осаждения, а уменьшение  $\sigma_2$  оказывает сильное влияние на активность осаждения. Такое явление объясняется действием сил динамического давления диагонально-направленных потоков, приводящих к срыву осевших частиц золы;

6. Шероховатость поверхности стенки труб влияет на осаждение частиц только в начальный период времени работы оборудования, далее, по мере формирования слоя влияние шероховатости устремляется к нулю;

7. Направление движения потока в секция конвективных пакетов по схемам («сверху-вниз» или «снизу-вверх») оказывает влияние на активность процессов осаждения. При использовании схемы «снизу-вверх» коэффициенты загрязнения оказываются до 10 % выше в сравнении со схемой «сверху-вниз», что предположительно, происходит из-за влияния сил гравитации на траекторию движения частиц;

8. Активность роста отложений зависит от тепловых условий загрязнённой поверхности труб конвективного пакета. Увеличение температуры потока способствует снижению модуля Юнга как у частиц, так и у поверхностного слоя отложений, что увеличивает активность процессов осаждения. Высокая температура потока, омывающего слой отложений со временем, приводит к уплотнению слоя, что затрудняет его удаление. При больших градиентах температуры между частицей и поверхностью осаждения увеличивается действие влияющей на траекторию движения частиц малого диаметра термофоретической силы, способствующей интенсификации процессов осаждения;

9. В первые три часа работы оборудования с момента его запуска коэффициенты загрязнения активно возрастают, а, далее, темп их роста асимптотически снижается, и с течением времени устремляется к постоянной величине.

## **2. Обоснованная форма профиля поперечного сечения конвективных труб, позволяющая снизить активность роста натрубных отложений.**

Согласно проведённому анализу форм сечения профиля наружной поверхности труб, установлено их значительное влияние на характер движения запылённого газового потока и активность осаждения сажистых и золовых частиц на поверхности трубок. Выявлена форма профиля трубы, обеспечивающая наименьшую степень загрязнения конвективных пакетов в процессе их эксплуатации (Рисунок 1).

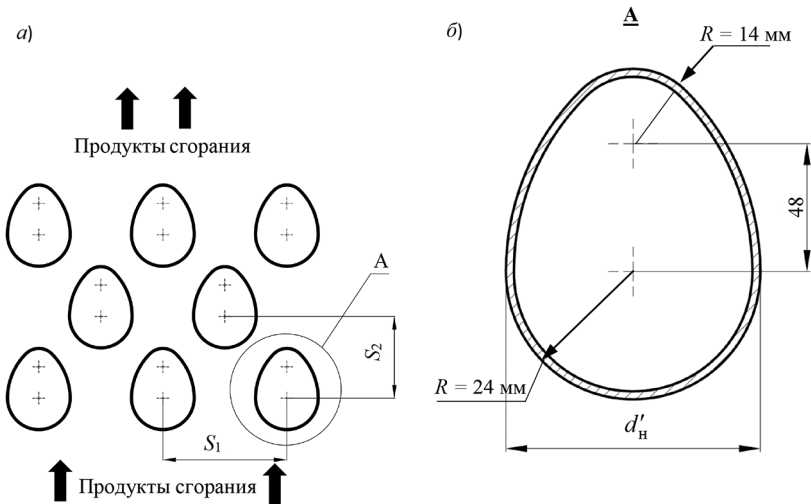


Рисунок 1 – Конвективный пакет с трубками овоидальной формы профиля поперечного сечения наружной поверхности: а) – схема расположения трубок в конвективном пакете относительно направления запылённого потока продуктов сгорания; б) – овоидальная форма профиля наружной поверхности трубок

В дальнейшем численное моделирование показало, что в сравнении с круглыми трубками при оснащении конвективных пакетов овоидальными трубками средняя толщина загрязнений меньше. Следовательно, при использовании овоидальных трубок тепловая эффективность работы оборудования за период его эксплуатации будет более высокой, что скажется на снижении расхода топлива и себестоимости выработки тепловой энергии.

### 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.

Для проведения эксперимента по выявлению динамики формирования нарубных отложений в конвективных пакетах принят водотрубный отопительный котлоагрегат КВу-1,0, производства ООО «Балткотломаш» (г. Санкт-Петербург).

Для выполнения задачи исследований использовалось действующее теплогенерирующее оборудование, установленное в п. Хвалово, Ленинградской обл. (Рисунок 2).

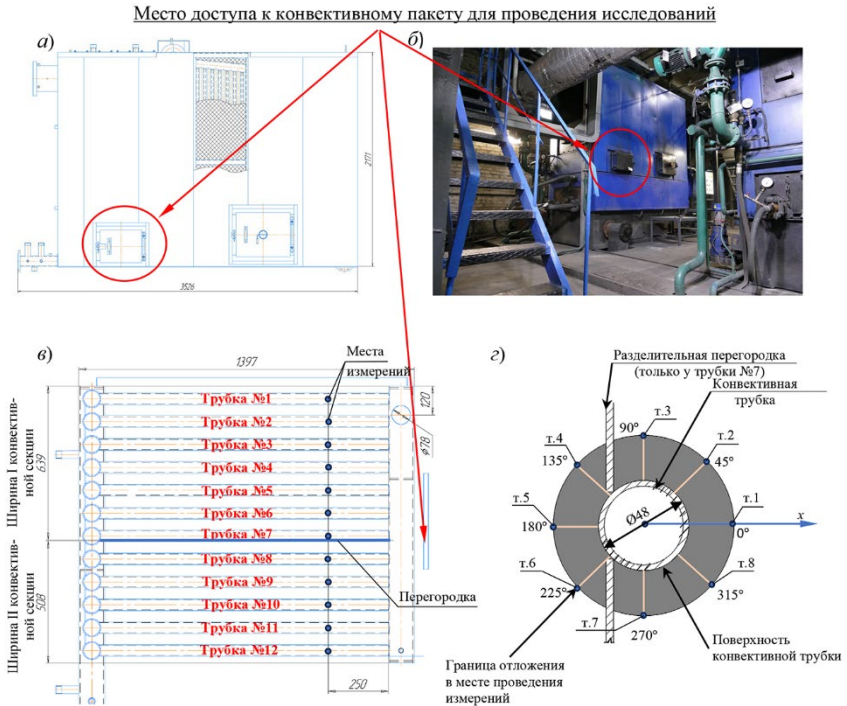


Рисунок 2 – Схема котла КВу-1,0 (экспериментальной установки):

- а) – боковой вид котла; б) – изображение бокового вида котла в отопительной котельной; в) – схема размещения труб в конвективных секциях; г) – точки проведения замеров толщины отложений

Исследование заключалось в выявлении толщины слоя, образовавшихся сажистых и золовых отложений по наружным поверхностям труб. Измерения проводились на трубках доступных для проведения измерений через обслуживающие лючки в точках по окружности, согласно схеме (см. рис. 2, г). Измерения производилось с помощью цифровой камеры *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) и последующей компьютерной обработкой полученных изображений методом сопоставления разрешения растровых изображений (количества пикселей, приходящихся на область изображения с объектом) загрязненных участков трубы с участком трубы, очищенным от отложений (Рисунок 3).



Рисунок 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 трубки; г) – изображение с наложенной сеткой

Для создания численных моделей работы конвективного пакета в условиях запыленного потока разработана математическая модель, описывающая характер движения частиц и физические принципы их взаимодействия со стенками труб.

Модель осаждения частиц основана на уравнении их критической вязкости (1), устанавливающим условия осаждения частиц на поверхности трубок. При столкновении частицы с поверхностью процесс осаждения наступит, если скорость частицы  $v_p$  в момент касания частиц о поверхность будет меньше критической скорости  $v_{p, cr}$ , а угол удара о поверхность  $\theta_p$  меньше критического угла прилипания  $\theta_{p, cr}$ .

Критическая скорость осаждения частиц на поверхность  $v_{p, cr}$ , м/с:

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

где  $d_p$  – диаметр частиц, м;  $R$  – коэффициент восстановления ( $R = 0,9$ );  $\varphi$  – угол столкновения частиц с поверхностью осаждения, рад;  $K$  – параметр, зависящий от свойств материалов стенки трубы и золотых частиц.

Критический угол прилипания  $\theta_{p, cr}$ , рад:

$$\operatorname{tg} \theta_{p, cr} = \frac{\mu^*}{(32\beta^3)^{0,5}} \sqrt{\frac{E^*}{G^*}}, \quad (2)$$

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;

$\mu^*$  – коэффициент трения ( $\mu^* = 0,2 - 0,3$ );  $\beta$  – коэффициент эффективного радиуса контакта ( $\beta = 0,09 - 0,15$ );  $E^*$  – эффективный модуль Юнга, Па;  $G^*$  – эффективный модуль сдвига, Па.

Критическая кинетическая энергия частиц  $E_{ERE}$ :

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

где  $d_T$  – максимальный коэффициент рассеивания;  $\theta_p$  – угол контакта, °.

По конструкции котлоагрегата КВу-1,0 создана геометрическая модель конвективных пакетов с круглыми (Рисунок 4) и овоидальными формами труб для численного моделирования в 2D-постановке. Модель конвективных пакетов с двумя секциями позволит учесть влияние смены направления движения потока на процессы осаждения частиц.

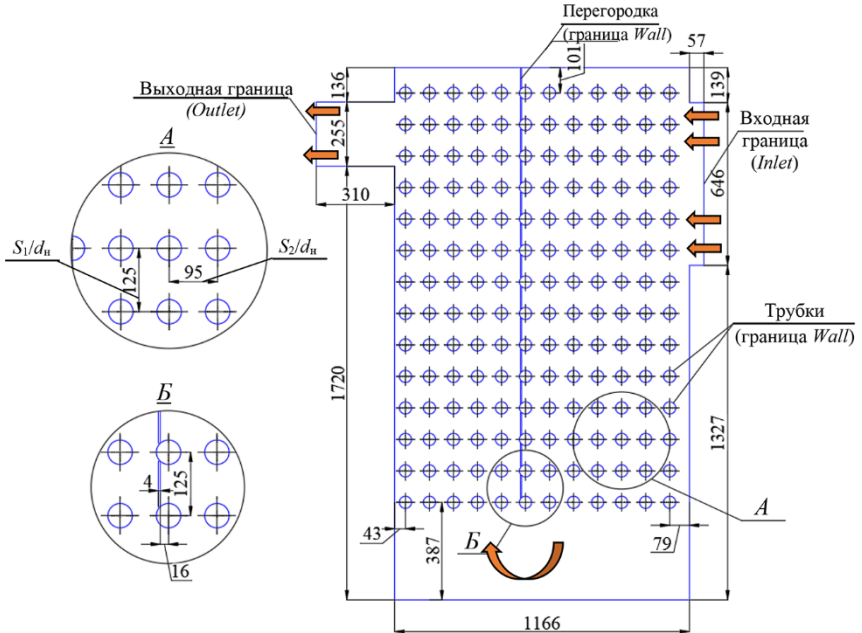


Рисунок 4 – Геометрическая модель конвективного пакета котла КВу-1,0 с границами

Граничные условия для потока и частиц задавались на входных границах в соответствии с режимными параметрами работы котла на угле марки «ДО» (Длиннопламенный орех) согласно таблице 1.

Численное моделирование выполнялось в нестационарной постановке, основываясь на модели турбулентности  $k-\omega$  ( $SST$ ) (модели Ментора),

решаемых с использованием ПК *ANSYS Fluent* с подключением модели дискретных фаз (*DPM*) для отслеживания траектории движения частиц. Для учёта влияния на частицы сил внешнего воздействия при постановке задачи моделирования активированы стандартные уравнения: термодиффузионная сила (*Thermophoretic Force*), подъемная сила Саффмана (*Saffman Lift Force*), сила, равноценная воздействию присоединённой массы (*Virtual Mass Force*), сила градиента давления (*Pressure Gradient Force*).

Таблица 1 – Характеристики частиц и газового потока, принятые при численном моделировании процессов осаждения в конвективных пакетах в зависимости от тепловой нагрузки оборудования

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 <sup>3</sup>	2300		
Максимальный диаметр, мм	0,1		
Минимальный диаметр, мм	0,0025		
Средний диаметр, мм	0,016		
Концентрация, кг/с	$2,049 \cdot 10^{-6}$		

На рисунке 5 представлена сетка для расчетной области конвективного пакета. Сетка состоит из треугольных элементов с максимальным размером 5 мм. Для получения более точного решения при выполнении численного моделирования затухания турбулентных вихрей вблизи поверхности трубок и взаимодействия с ними частиц золы сетка дополнена областями сгущения толщиной 5 мм. По окружности труб было создано 100 угловых промежутков сетки.

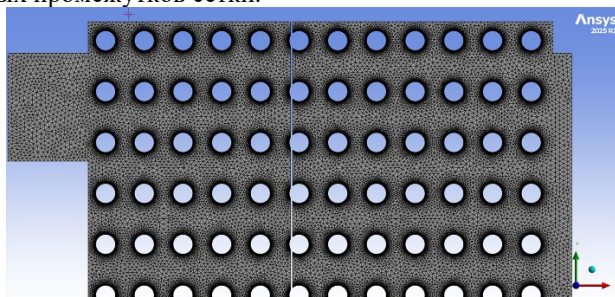


Рисунок 5 – Фрагмент расчётной сетки конвективного пакета с круглыми трубками

Решение задачи выполнялось с применением динамической сетки (*Dynamic Mesh*), отвечающей за перестроение границ наружной поверхно-

сти в зависимости от толщины формирующегося слоя отложений в определённый момент времени. Поведение частиц в потоке при столкновении со стенкой, дополнительно описывается математической моделью, рассмотренной выше, реализованной во *Fluent* путём подключения к расчёту *UDF*-функций (пользовательских функций). Численное моделирование выполнялось для каждого режима работы котла и каждой конструкции конвективного пакета.

#### 4. Зависимости влияния конструкции конвективных пакетов и режимных параметров работы котлов на коэффициенты загрязнения.

Для получения объективных данных по характеру загрязнения труб конвективных пакетов исследовались ряды труб у двух котлов КВу-1,0. Результаты исследования толщины слоя отложений по нижнему ряду труб на расстоянии 250 мм от бокового стояка для котла №2 представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Толщина слоя отложений (мм) для нижнего ряда труб

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

Профили поверхности отложений на трубках №8–№11 при движении дымовых газов в секции конвективных пакетов по схемам «сверху-вниз» и «снизу-вверх» представлены на (Рисунок 6, а) и (Рисунок 6, б) соответственно.

Результаты исследований толщины слоя отложений на крайних трубках (№12) в секции конвективных пакетов, расположенных на расстоянии 300 мм от бокового стояка представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Толщина слоя отложений (мм) для трубок №12 на расстоянии 300 мм

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

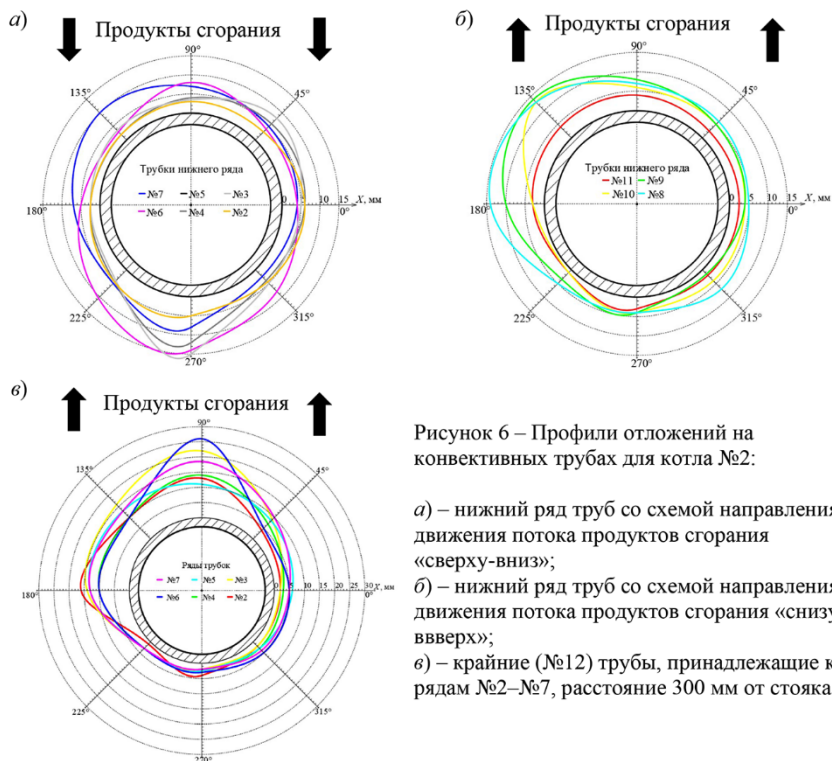


Рисунок 6 – Профили отложений на конвективных трубах для котла №2:

а) – нижний ряд труб со схемой направления движения потока продуктов сгорания «сверху-вниз»;

б) – нижний ряд труб со схемой направления движения потока продуктов сгорания «снизу-вверх»;

в) – крайние (№12) трубы, принадлежащие к рядам №2–№7, расстояние 300 мм от стояка.

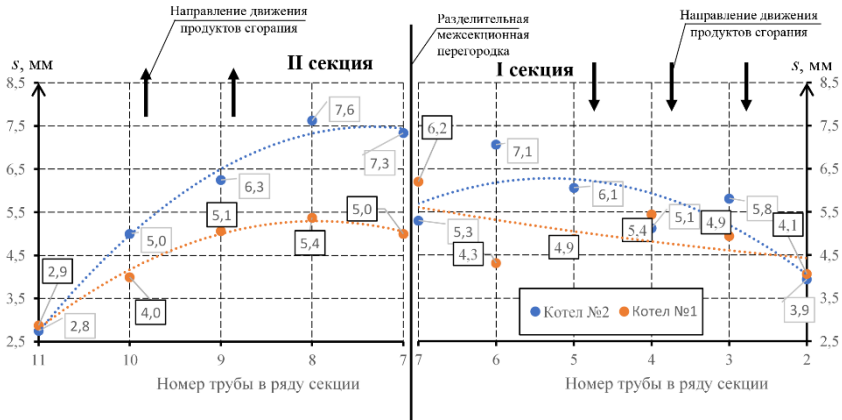


Рисунок 7 – Зависимости усредненных значений толщины отложений на конвективных трубах по длине нижнего ряда труб для котлов №1 и №2

Профили отложений на трубах №12 расположенных 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 (Рисунок 6, в). По результатам обработки исследований толщины отложений для нижнего ряда труб конвективных пакетов для котлов №1 и №2 получены зависимости средней толщины натрубных отложений по длине нижнего ряда труб (Рисунок 7).

Среди исследованных секций, трубок с «чистыми» поверхностями не выявлено. Минимальное и максимальное значение толщины слоя натрубных отложений в трубах нижнего ряда у котла №1 при схеме движения газового потока «сверху-вниз» равны 2 мм и 7 мм соответственно, а при схеме «снизу-вверх» – 1,5 мм и 14 мм соответственно. Минимальное и максимальное значение толщины слоя натрубных отложений в трубах нижнего ряда у котла №2 при схеме движения газового потока «сверху-вниз» 1 мм и 14 мм соответственно, а при схеме «снизу-вверх» – 2,5 мм и 14 мм соответственно. Значения свидетельствуют, что схема движения оказывает влияние на интенсивность образования отложений, однако, стоит отметить, что данное явление также может объясняться неравномерностью концентрации золых частиц наблюдающейся по рядам трубок и снижением её в связи с процессами осаждения.

По длине трубок значения толщины отложений замерялись у трубок №12 на расстоянии 300, 600, 900 мм от стояка конвективного пакета. Минимальная толщина слоя отложений (1 мм) обнаружена на трубке ряда №2 на расстоянии 300 мм от стояка; максимальная толщина слоя отложений (30 мм) обнаружена на трубке в ряду №7 на расстоянии 600 мм от стояка

(центр трубки). Стоит отметить, что для всех трех исследованных расстояний максимальные толщины обнаружены при угле измерения  $90^\circ$  (т.3) на трубке ряда №7, и в целом при этом угле точки измерения толщина отложений на всех рядах у трубок №12 оказалась выше, чем при других углах точек измерений.

При планировании эксперимента использован метод обработки натуральных экспериментов Р. Фишера.

В задаче исследований стояло получение зависимости толщины отложений  $\delta_3$  на основе натурального исследования.

Для создания зависимости использовано уравнение регрессии в виде:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + \dots + b_{n-1,n} X_{n-1} X_n, \quad (4)$$

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

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j, \quad (5)$$

где  $N$  – количество экспериментов.

Функцией отклика является толщина накопленных за отопительный период работы котлов слоя натрубных отложений  $\delta_3$  на поверхности труб №1 в каждом ряду конвективного пакета (мм). Ожидается, что значение толщины будут зависеть 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,  $^\circ$ .

Верхний и нижний уровни каждого фактора, их основной уровень, а также интервал варьирования фактора в эксперименте представлены в таблице 4.

Таблица 4 – 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 его действительного значения определяется уравнениями:

$$X_1 = \frac{Z_1 - 4}{2}, X_2 = \frac{Z_2 - 600}{300}, X_3 = \frac{Z_3 - 90}{45} \quad (6)$$

В таблице 5 представлена матрица планирования полного факторного эксперимента (ПФЭ) «2<sup>3</sup>». Количество факторов равно 3, соответственно количество экспериментов равно 8. Символ «+» в строчках таблицы 5 означает, что в эксперименте фактор принимает значение верхнего уровня, а символ «-» – нижнего уровня.

Таблица 5 – Матрица планирования натурального эксперимента

№ эксперимента	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>
1	+	+	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	-	+	-
3	+	-	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	-	+	-	-	-
6	-	+	-	-	+	-	+
7	+	-	-	-	-	+	+
8	-	-	-	+	+	+	-

После раскодирования факторов получена зависимость толщины отложений  $\delta_3$ :

$$\delta_3 = 1,125Z_1 + 0,0192Z_2 + 0,161Z_3 - 0,0025Z_1Z_2 - 0,0222Z_1Z_3 - 0,000296Z_2Z_3 + 0,000065Z_1Z_2Z_3 - 5,5. \quad (7)$$

**5. Усовершенствованная методика инженерного расчёта, позволяющая вычислять значения коэффициентов загрязнения для конвективных поверхностей нагрева в зависимости от режимных параметров работы котлоагрегата и особенностей их конструкции.**

Другая задача исследования заключалась в получении расчетной зависимости коэффициентов загрязнения ( $\epsilon$ ) по результатам численного моделирования конвективной поверхностей нагрева котлов в условиях запыленного потока. Функцией отклика является значение коэффициента загрязнения ( $\epsilon$ ).

Значение  $\epsilon$  находится в зависимости от факторов: Z<sub>1</sub> – расход продуктов сгорания в конвективном пакете G<sub>п.с.</sub>, кг/с; Z<sub>2</sub> – схема расположения труб в пучке (шахматная или коридорная); Z<sub>3</sub> – форма поперечного сечения труб (круглая или овоидальная); Z<sub>4</sub> – относительный поперечный шаг труб,  $\sigma_1$  (шаг труб в ряду).

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

Верхний и нижний уровни в полном факторном эксперименте (ПФЭ) «2<sup>4</sup>», а также основной уровень и интервал варьирования фактора при постановке задачи численного моделирования представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Кодирование факторов эксперимента

Факторы	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень	Интервал варьирования
Расход продуктов сгорания в конвективном пакете $G_{п.с.}$ , кг/с; ( $Z_1$ )	0,091	0,194	0,297	0,103
Схема расположения труб в пучке (шахматная или коридорная); ( $Z_2$ )	-1	0	1	1
Форма поперечного сечения труб (круглая или овоидальная); ( $Z_3$ )	-1	0	1	1
Относительный поперечный шаг труб, $\sigma_1$ (шаг труб в ряду); ( $Z_4$ )	1,98	2,18	2,38	0,2
Кодированные значения факторов	-1	0	1	1

Таблица 7 – 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	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+

Окончание табл. 7

№ эксперимента	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_1X_2$	$X_1X_3$	$X_1X_4$	$X_2X_3$	$X_2X_4$	$X_3X_4$	$X_1X_2X_3$	$X_1X_2X_4$	$X_1X_3X_4$	$X_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3X_4$
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

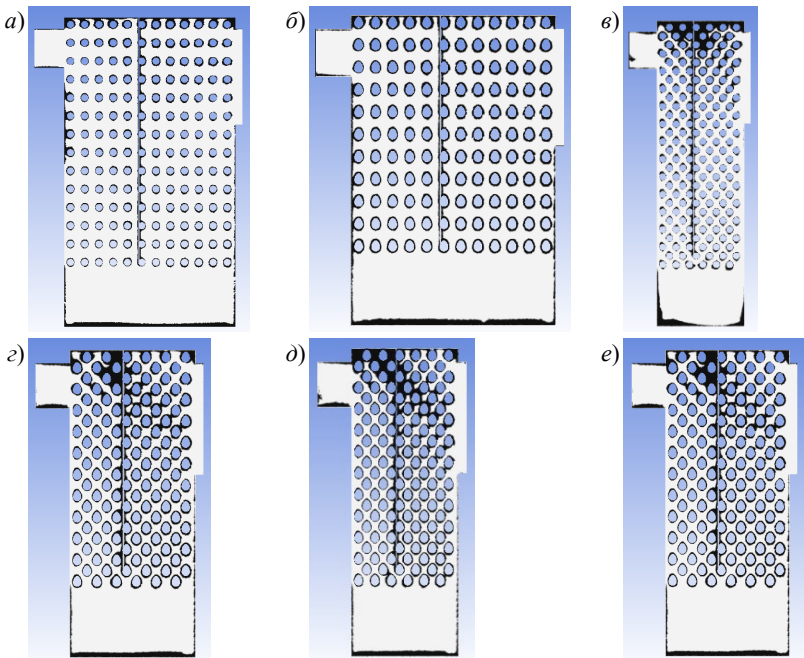


Рисунок 8 – Форма слоя отложений: а) – коридорный пучок, круглый профиль поперечного сечения труб,  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с,  $\sigma_1 = 1,98$ ; б) – коридорный пучок, овоидальный профиль поперечного сечения труб,  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с,  $\sigma_1 = 1,98$ ; в) – шахматный пучок, круглый профиль поперечного сечения труб,  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с,  $\sigma_1 = 1,98$ ; г) – шахматный пучок, овоидальный профиль поперечного сечения труб,  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с,  $\sigma_1 = 1,98$ ; д) – шахматный пучок, овоидальный профиль поперечного сечения труб,  $G_{п.с} = 0,091$  кг/с,  $\sigma_1 = 1,98$  е) – шахматный пучок, овоидальный профиль поперечного сечения труб,  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с,  $\sigma_1 = 2,38$

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

Зависимость кодированной величины от его действительного значения определяется уравнениями:

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{Z_1 - 0,194}{0,103}, & X_2 &= \frac{Z_2 - 0}{1}, \\ X_3 &= \frac{Z_3 - 0}{1}, & X_4 &= \frac{Z_4 - 2,18}{0,2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Определено 16 вариантов параметров конвективных пакетов, сведенных в виде матрицы планирования (Таблица 7), для которых получены численные модели формы слоя отложений, некоторые из них представлены на рисунке 8.

Результаты численного моделирования обобщены в виде графика, представленного на рисунке 9.

Для создания обобщенной зависимости для  $\varepsilon$  использовано уравнение регрессии (7). Значения коэффициентов регрессии рассчитаны с применением зависимости (5) и представлены в диссертации.

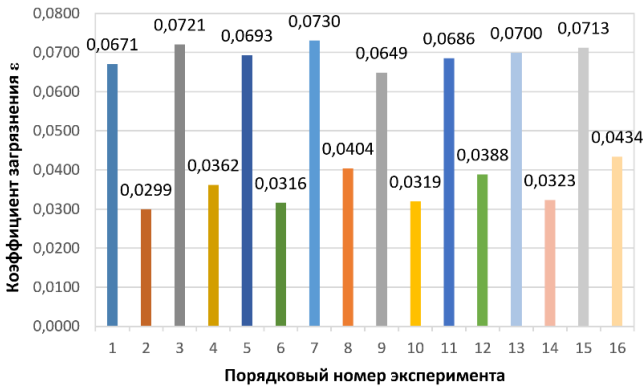


Рисунок 9 – Значения  $\varepsilon$ , полученные по результатам численного моделирования

После преобразования с учетом полученных по результатам численного моделирования данных с учётом коэффициентов регрессии уравнение примет вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,05255 - 0,01698X_1 + 0,002921X_2 + 0,00136X_3 + 8,67X_4 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 0,001204X_1X_2 - 1,3X_1X_3 \cdot 10^{-5} + 0,000953X_1X_4 - 5X_2X_4 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 0,000227X_3X_4 + 0,000655X_1X_2X_3 + 0,000413X_1X_2X_4 - 0,00035X_1X_3X_4 + \\ &+ 3,4X_2X_3X_4 \cdot 10^{-5} + 0,00017X_1X_2X_3X_4. \end{aligned} \quad (9)$$

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 обеих схем размещения трубок в пакете (шахматной или коридорной), а также видов форм профиля наружной поверхности поперечного сечения трубок уравнение (9) преобразуется к виду, представленному в таблице 8.

Таблица 8 – Расчетные формулы для вычисления коэффициента загрязнения ( $\epsilon$ )

Форма профиля труб	Схема расположения труб в пучке	
	Коридорная	Шахматная
Круглая	$\epsilon = \sigma_1(0,05781G_{п.с} - 0,00987) - 0,27287G_{п.с} + 0,10706$ (10)	$\epsilon = \sigma_1(0,00081G_{п.с} + 0,00165) - 0,18473G_{п.с} + 0,0827$ (12)
Овоидальная	$\epsilon = \sigma_1(0,07489G_{п.с} - 0,01549) - 0,32259G_{п.с} + 0,1186$ (11)	$\epsilon = \sigma_1(0,05169G_{п.с} - 0,01045) - 0,28265G_{п.с} + 0,10424$ (13)

Расчетные формулы таблицы 8 справедливы для расхода продуктов сгорания  $G_{п.с}$  от 0,091 до 0,297 кг/с и относительного поперечного шага труб в пучке от 1,98 до 2,38 для схем с поперечным омытием труб запылённым потоком.

Коэффициент загрязнения  $\epsilon$  ( $m^2 \cdot ^\circ C / Вт$ ) зависит от: расхода дымовых газов на входе в рассматриваемый конвективный блок, схемы размещения труб в пучке, формы сечения труб, относительного поперечного шага труб в пучке и может быть вычислен по одной из формул представленной в таблице 8.

С использованием полученных при обработке результатов численного моделирования (зависимости 10–13) построены зависимости коэффициентов загрязнения ( $\epsilon$ ) для секций конвективных пакетов при работе котлов в диапазонах значений расхода продуктов сгорания от 0,091 до 0,297 кг/с при  $\sigma_1 = 1,98$  и относительного поперечного шага труб в пучке от 1,98 до 2,38 при  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с как для круглой, так и овоидальной форм поперечного сечения труб, размещенных в шахматной или коридорной схемах (Рисунок 10).

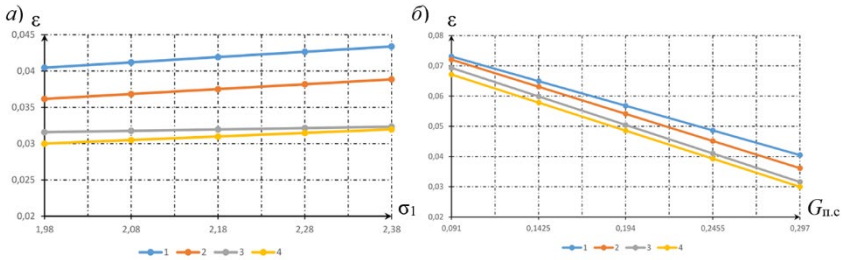


Рисунок 10 – Зависимость  $\varepsilon$ , ( $\text{м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ) от: а) – относительного продольного шага при  $G_{п.с} = 0,297$  кг/с, б) – расхода продуктов сгорания при  $\sigma_1 = 1,98$ ;  
 1) – коридорный пучок с трубами круглой формы (зависимость 10);  
 2) – коридорный пучок с трубами овоидальной формы (зависимость 11);  
 3) – шахматный пучок с трубами круглой формы (зависимость 12);  
 4) – шахматный пучок трубами овоидальной формы (зависимость 13).

В инженерной методике теплового расчета конвективных поверхностей нагрева, представленной в нормативном методе, значения коэффициентов загрязнения  $\varepsilon$  используются для определения средней абсолютной температуры наружной поверхности стенок труб конвективного пакета:

$$T_3^{ср} = t_2^{ср} + \left( \varepsilon + \frac{1}{\alpha_2} \right) \frac{B_p}{F} Q_6 + 273, K \quad (14)$$

где  $t_2^{ср}$  – средняя температура нагреваемого теплоносителя в конвективных пакетах,  $\text{°C}$ ;  $\varepsilon$  – коэффициент загрязнения,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}/\text{кДж}$ ;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности труб пучка к нагреваемому теплоносителю,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C})$ ;  $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/ч;  $F$  – площадь поверхности нагрева конвективных труб,  $\text{м}^2$ ;  $Q_6$  – количество теплоты по балансу,  $\text{кДж}/\text{кг}$ .

В инженерной методике влияние термического сопротивления натрубных отложений также учитывается при расчёте коэффициента тепловой эффективности  $\psi$ :

$$\psi = \frac{1}{\alpha_1 \varepsilon + 1}. \quad (15)$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания к стенке конвективных труб,  $\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C})$ .

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

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

4. 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;

5. Получена регрессионная зависимость толщины натрубных отложений  $\delta_3$  от местоположения поверхности осаждения конвективного пакета в пространстве;

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

7. Усовершенствована методика теплового расчёта конвективных пакетов, позволяющая вычислять коэффициенты загрязнения  $\epsilon$  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.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ**

1. **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.

2. **Каштанов Д.И.** Определение скорости осаждения сажистых частиц в конвективных пучках водотрубных котлов // *Вестник гражданских инженеров*. – 2025. – №2 (109). – С. 95–105.

3. **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>.

### **Доклады и материалы конференций**

4. **Каштанов Д.И.** Анализ влияния смещения рядов конвективных труб круглой и овоидальной форм поперечного сечения на эффективность

передачи теплоты в водотрубном котле КВ-ГМ-0,8 // Развитие строительной отрасли: сборник материалов II Межрегиональной конференции (21–24 сентября 2023 года) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Вологодский государственный университет; [ответственный редактор Н. М. Дементьев]. – Вологда: ВоГУ, 2024. С. 52–56.

5. **Каштанов Д.И.**, Яковлев В.А. Подход к численному моделированию золовых отложений на поверхности труб конвективного блока водотрубного котла // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air quality and environment: материалы XXIII Международной научной конференции, 18–24 сентября 2025 г., г. Душанбе / Мин-во строительства и ЖКХ РФ; НИИ строит. физики РААСН; Таджикский технический университет им. академика М. С. Осими; Российское общество инженеров строительства; Научный Совет РААСН «Энергоэффективная среда жизнедеятельности»; Нижневолжское представительство южного регионального отделения ЮТО РААСН [сост. А. Н. Гвоздков]. – Волгоград: Издательство ВолгГМУ, 2025. – 300 с. – С. 230–237.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 06.07.2026. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 62.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А