



Исследование золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных блоков твердотопливного котла малой мощности

Д. И. Каштанов ✉

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, 190005, Российская Федерация

✉ dmitrii.kas@gmail.com



Аннотация. Приведены результаты исследования состояния золовых отложений на поверхности труб круглого поперечного сечения конвективных блоков двух водогрейных отопительных котлов КВу-1.0 (производитель – ООО «Балткотломаш», г. Санкт-Петербург) тепловой мощностью 1.0 МВт каждый при работе на длиннопламенном каменном угле с гранулометрическим составом 20–50 мм. Дано краткое описание физических свойств золовых отложений и факторов их формирования на поверхности труб во время работы котлов. По результатам натурных измерений отложений, сформировавшихся за отопительный сезон 2023–2024 г., выполнен анализ роста натрубных золовых отложений, где в виде графиков, построенных в проекции поперечного сечения конвективных труб диаметром 48 мм, представлена форма отложений золы.

Ключевые слова: золовые отложения, натурное обследование, конвективные пучки, сжигание угля, водогрейный отопительный котел

Для цитирования: Каштанов Д. И. Исследование золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных блоков твердотопливного котла малой мощности. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):50–62. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-50-62> EDN: AWFLEP

Study of ash deposits on the outer surfaces of convective tubes in a low-power solid fuel boiler

Dmitriy I. Kashtanov ✉

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Saint-Petersburg, 4, 2nd Krasnoarmeiskaya St., 190005, Russian Federation

✉ dmitrii.kas@gmail.com



Abstract. This study presents the results of an investigation into the state of ash deposits on the surface of circular cross-section pipes in the convective sections of two hot-water heating boilers, model KVu-1.0 (manufactured by Baltkottlomash LLC, St. Petersburg), each with a thermal capacity of 1.0 MW. The boilers were operating on long-flame coal with a granulometric composition of 20–50 mm. The physical properties of the ash deposits and the factors influencing their formation on the pipe surface during boiler operation are briefly described. Based on the results of in-situ measurements of deposits formed during the 2023–2024 heating season, the growth of tube ash deposits was analyzed. The shape of the ash deposits is presented through graphs depicting their cross-sectional projection on convective tubes with a diameter of 48 mm.

Keywords: ash deposits, in-situ measurements, convective beams, coal burning, hot-water heating boiler

For citation: Kashtanov D. I. Study of ash deposits on the outer surfaces of convective tubes in a low-power solid fuel boiler. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):50–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-50-62>

1. Введение / Introduction

При рассмотрении вопросов, связанных с экономией топлива и повышением тепловой эффективности работы тепловых энергоустановок, наблюдается большой интерес к исследовательской деятельности в области физических процессов, связанных с образованием золовых и сажистых отложений на наружных стенках теплообменных поверхностей нагрева водотрубных котлоагрегатов, работающих на твердых видах топлива [1–3].

Образование шлаковых (вязких) и сыпучих (свободных) золовых отложений является одной из основных причин внеплановых выводов котлоагрегатов из строя [1, 4]. Проблема, возникающая вследствие образования золовых и сажистых отложений, связана со снижением коэффициента теплопередачи k , Вт/м²·°С, от греющего теплоносителя к нагреваемому, что приводит к падению КПД котлоагрегата [5]. Вследствие данного явления увеличивается расход топлива на единицу вырабатываемой тепловой энергии, что не соответствует поставленным задачам по эффективному использованию топливно-энергетических ресурсов в области коммунальной и промышленной теплоэнергетики. Кроме того, загрязнения поверхностей нагрева конвективных блоков котлов, особенно в случаях выбора неэффективных способов сжигания топлива или несвоевременной очистки оборудования от загрязнений, приводят к формированию массивных слоев золовых отложений, что является следствием понижения тепловой мощности котла и отпуска тепловой энергии потребителям [6–8].

В работах [9–12] представлена схема (рис. 1) поэтапного преобразования частицы угольного топлива в золовую частицу при горении. Выгорание частицы угольного топлива включает в себя следующие этапы: сушка топлива [10, 13] с выходом гигроскопической влаги, выход летучих, горение летучих, догорание коксового остатка, формирование негорючих золовых частиц.

В принятой классификации обнаруженные в котлах золовые отложения в зависимости от прочности связывания их как между отдельными частицами загрязнений, так и между частицами загрязнений и материалом теплообменных труб подразделяются на несколько типов [7, 15, 16]: сыпучие, связанные, шлаковые и связанно-шлаковые. Шлаковые и связанно-шлаковые золовые отложения образуются преимущественно в высокотемпературных зонах топочного пространства, в связи с чем либо полностью, либо частично находятся в расплавленном состоянии. Отложения такого типа обычно обладают плотным структурным строением и повышенной прочностью из-за высокой спекаемости частиц [8]. Сыпучие и связанные структуры золовых отложений обычно формируются в зонах с невысокими температурами (конвективных секциях) и обладают преимущественно слоистой структурой с менее прочными связями между частицами [8].

Замена вида сжигаемого в котлоагрегате топлива или способа сжигания (переход на другую марку угля, совместное сжигание нескольких видов топлива или сжигание новых видов топлива) мо-

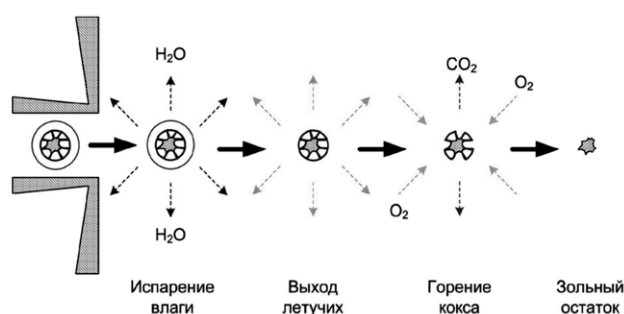


Рис. 1. Этапы выгорания угольной частицы в золовую частицу при горении [14]

Fig. 1. Stages of coal particle burnout into ash during burning [14]

жет оказать существенное влияние на режимы осаждения частиц летучей золы и характер образующихся натрубных отложений [5, 17].

В работах [2, 18] представлены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых изучен процесс формирования отложений на наружной поверхности, расположенной в проходном канале одиночной трубы с круглой формой поперечного сечения наружной поверхности при различных режимных условиях, создаваемых во время проведения эксперимента. Было проведено три эксперимента, в ходе которых менялись скорость и температура запыленного потока продуктов сгорания, а также концентрация золовых частиц. Характеристики запыленного потока в опыте устанавливались следующие: температура потока, омывающего трубку, – 520 °С, скорость потока – 1.11 м/с, концентрация золовых частиц в потоке – 0.108 г/м³. В течение первых 10 мин нахождения трубки в запыленном потоке форма поверхности отложившегося слоя золовых частиц является неровной из-за низкой скорости потока, при которой еще не наблюдается явление сноса частиц с поверхности, тогда как при более высоких скоростях поток, отрывая налипшие на поверхность частицы, приводит к эффекту сглаживания неровностей наружной поверхности отложений. Поверхность сформировавшегося слоя отложений обычно имеет множество выемок и хребтов, обладающих наклоном в сторону движения газового потока. При проведении серии экспериментов выявлено, что увеличение скорости запыленного потока оказывает значительное влияние на интенсивность роста толщины отложений на поверхности трубки в интервале 10–20 мин. С увеличением скорости (с 1.58 до 2.05 м/с) и уменьшением концентрации золовых частиц (с 0.076 до 0.058 г/м³) в запыленном потоке продуктов сгорания на поверхности трубки во временном интервале 25–30 мин наблюдается снижение интенсивности роста золовых отложений. При этом высота слоя отложений в последние 5 мин проведения эксперимента остается величиной постоянной.

Цель исследования – выявление формирующейся структуры и формы поверхности отложений, имеющих важное значение для эффективной и надежной работы котлоагрегатов. Профили поверхности золовых отложений выявляют места с наибольшей склонностью к зарастанию проходных сечений межтрубных каналов конвективных пакетов водотрубных котлоагрегатов. Объект исследования: пучки труб конвективных блоков двух котлоагрегатов с механизированной топкой для сжигания угля.

Актуальность работы заключается в получении экспериментальных данных для уточнения величины термического сопротивления золовых отложений на конвективных поверхностях нагрева котлоагрегата малой мощности, используемой в тепловых расчетах.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Исследование геометрии сформировавшихся натрубных золовых отложений в период эксплуатации котлов в течение отопительного сезона на внешней поверхности труб конвективных пучков было выполнено в натурных условиях на действующем оборудовании, выведенном из работы в неотопительный период года. Данное исследование выполнялось после полного завершения охлаждения элементов котлоагрегатов.

Исследовались пучки труб конвективных блоков двух твердотопливных водотрубных водогрейных котлоагрегатов КВу-1.0 номинальной мощностью 1.0 МВт (производитель – ООО «Балткотломаш», г. Санкт-Петербург), оснащенных механизированной топкой. Котлоагрегаты предназначены для сжигания угля марки ДО («Длиннопламенный орех» [19]) с размером гранул от 20 до 50 мм. Проведение исследований двух одинаковых котлоагрегатов позволит сравнить полученные результаты измерений. Измерение толщины натрубных отложений производилось при помощи CMOS-камеры и последующей компьютерной обработки полученных данных путем сравнения размеров изображения загрязненных участков трубы с размером чистой конвективной трубы.

Схема расположения места доступа к конвективному пучку для проведения измерений и внешний вид котлоагрегата КВу-1.0 представлены на рис. 2а, б соответственно. Размещение труб в ряду конвективного пучка и точек мест замера толщины сформировавшегося слоя золовых отложений показаны на рис. 2с, д соответственно.

Обследование конвективных труб котлов было проведено в местах через лючки для обслуживания, размещенные в боковой и задней частях обшивки котла. Измерение толщины образовавшихся отложений на наружных поверхностях труб было проведено в 8 точках по окружности в полярных координатах (см. схему рис. 2с, д). Наружный диаметр конвективных труб равен 48 мм. Относительный поперечный шаг размещения труб в пучке равен $\sigma_1 = S_1/d_n = 1.98$; относительный продольный шаг размещения труб в пучке составил $\sigma_2 = S_2/d_n = 2.6$.

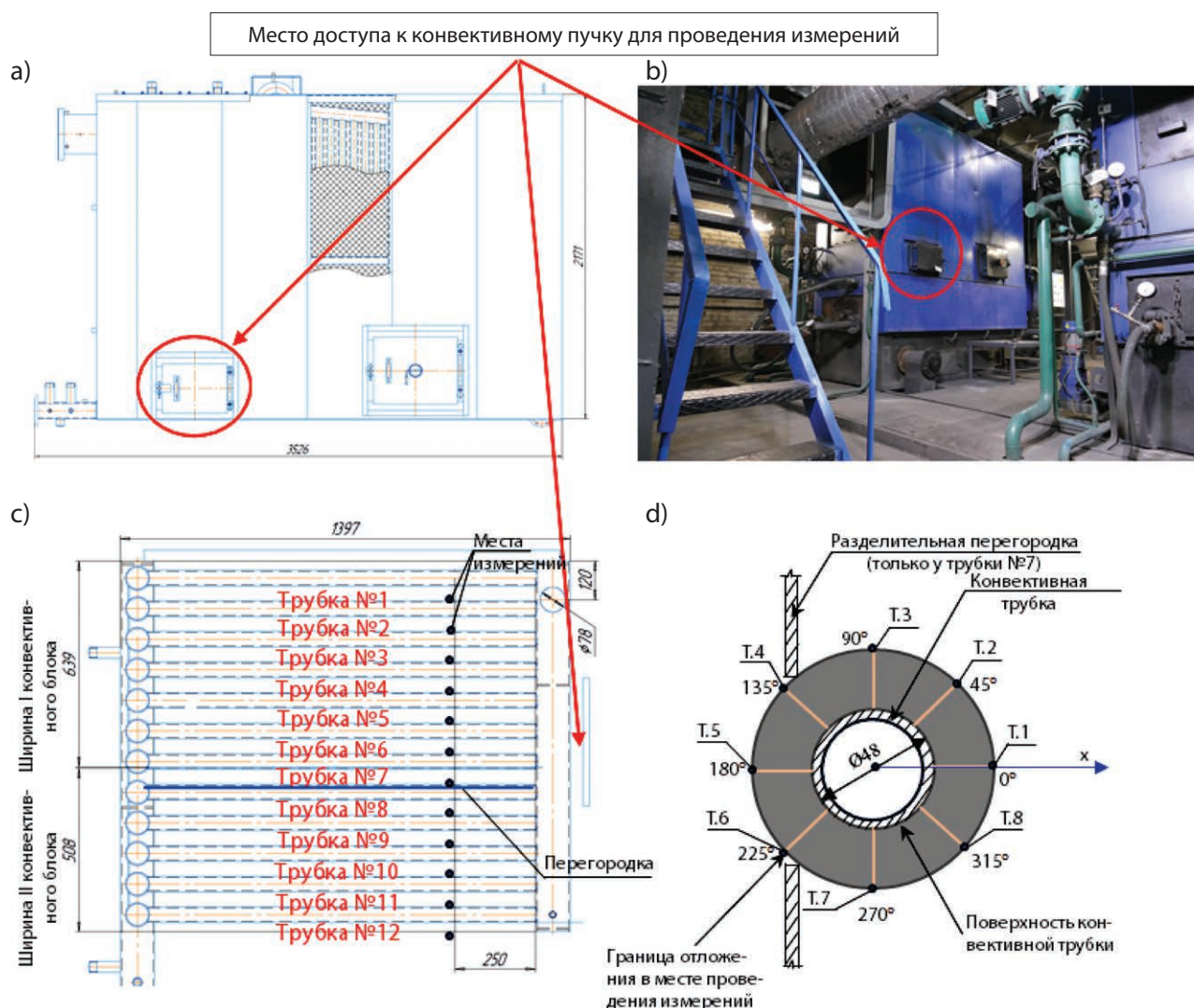


Рис. 2. Схема проведения измерений: а) боковой вид котла КВу-1.0; б) фотография бокового вида котла КВу-1.0, установленного в действующей отопительной котельной; в) схема расположения труб в конвективных блоках котлоагрегата КВу-1.0; д) точки мест замеров толщины золовых отложений (рисунок автора)
Fig. 2. Measurement setup: а) side view of the KVu-1.0 boiler; б) photo of the side view of the KVu-1.0 boiler installed in the operational heating plant; в) pipe layout in the convective sections of KVu-1.0 boiler unit; д) locations for measuring ash deposit thickness (author's figure)

Особенностью компоновки теплообменных блоков в конструкции котлоагрегатов КВу-1.0 является смонтированная перегородка у трубки 7, которая размещается согласно схеме (рис. 2d) и простирается на всю высоту конвективного пучка за исключением пространства под конвективным пучком, необходимого для организации перетока дымовых газов из одной конвективной секции с трубами 1–7 в другую конвективную секцию котла с трубами 8–12. В конвективных пакетах котлоагрегата КВу-1.0 предусмотрено две схемы движения дымовых газов: в первом конвективном пакете, установленном сразу за топкой, – с направлением движения дымовых газов сверху вниз, во втором конвективном пакете – с направлением движения дымовых газов снизу вверх. Такая особенность конструкции котла дает возможность проанализировать влияние направления движения потока дымовых газов на форму золовых отложений. Во избежание в процессе проведения замеров случайных обрушений рыхлых натрубных отложений золы были проведены измерения золовых отложений на трубах 2–11 нижнего ряда на расстоянии 25 см от мест врезки труб в стояк конвективного блока котла.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

В ходе исследования были сделаны фотографии внешнего вида поверхности натрубных отложений золы в конвективных блоках котлов 1 (рис. 3a, b).

Результаты исследования по точкам, отмеченным на рис. 2d, были сведены в журналы измерений, по данным которых построены профили форм наружных поверхностей (границ) золовых отложений, представленных в виде совмещенных круговых диаграмм в полярных координатах (рис. 4). Стрелками указано направление движения продуктов сгорания.

Проанализировав полученные данные в ходе обследования котла 1 и котла 2, можно сделать следующие обобщения:

- золовые отложения на трубах 10 и 11 нижнего ряда обоих котлов имеют наиболее плотную структуру слоя из всех обследованных труб нижнего ряда. Золовые отложения на трубах 7 в обоих котлах имеют наиболее рыхлую структуру слоя отложений из всех обследованных труб нижнего ряда;
- золовые отложения на трубах 8–11 в нижнем ряду котла 1 при направлении движения омывающего их потока дымовых газов снизу вверх имеют более равномерную толщину слоя отложений по периметру труб, чем у труб 2–7 при направлении движения омывающего их потока дымовых газов сверху вниз;
- наибольшая толщина золовых отложений (15 мм) в нижнем ряду конвективных трубок наблюдается на трубке 3 котла 2 в точке Т.7;
- наименьшая толщина золовых отложений (1 мм) в нижнем ряду конвективных трубок наблюдается на трубке 3 котла 2 в точке Т.6;
- наибольшие значения толщин золовых отложений наблюдаются в тыльных местах труб (по отношению к направлению движения дымовых газов).

После обработки результатов проведенных исследований толщины золовых отложений нижнего ряда труб конвективных пучков котлов 1 и 2 построены полиномиальные зависимости (рис. 5–8). К II конвективному блоку отнесены значения толщины отложений на трубе 7 в точках Т.4–Т.6, омываемые потоком снизу вверх, к I конвективному блоку отнесены значения толщины отложений на трубе 7 в остальных точках измерения, омываемые потоком сверху вниз.

Из рис. 5 видно, что зависимость осредненной толщины отложений (среднее арифметическое значение толщины золы в точках измерения) от места расположения труб в ряду является нелинейной функцией, характеризующей неравномерное осаждение золы по ширине конвективного блока. Наблюдается как увеличение, так и уменьшение осредненных значений золовых отложений

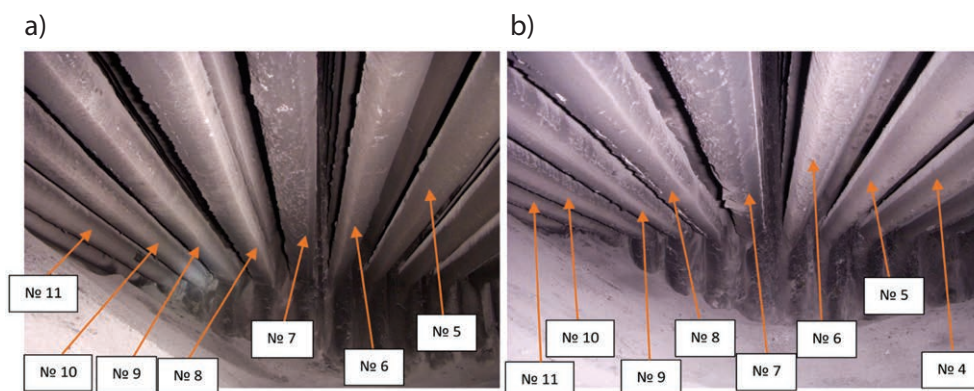


Рис. 3. Вид нижнего ряда труб конвективных блоков котлоагрегата КВу-1.0 с обозначением номера трубы согласно схеме рис. 2с: а) котла 1; б) котла 2 (рисунок автора)

Fig. 3. View of the lower row of pipes in the convective sections of the KVу-1.0 boiler unit, showing pipe numbers according to the scheme in Fig. 2с: а) boiler 1; б) boiler 2 (author's figure)

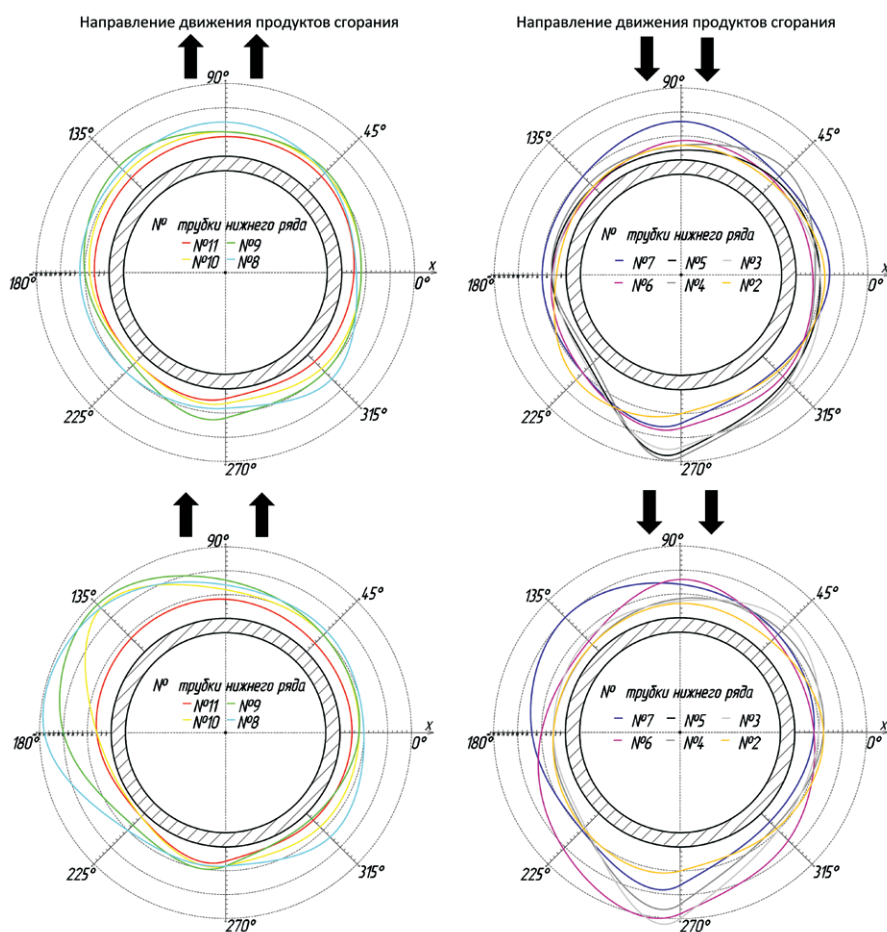


Рис. 4. Совмещенные диаграммы профилей форм (границ) наружных поверхностей золовых отложений на конвективных трубах 2–11 нижнего ряда: а) котел 1, II конвективный блок; б) котел 1, I конвективный блок; в) котел 2, II конвективный блок; д) котел 2, I конвективный блок (рисунок автора)

Fig. 4. Overlaid diagrams showing the profiles of ash deposits outer surfaces shapes (boundaries) on convective pipes 2–11 in the lower row: а) boiler 1, convective section II; б) boiler 1, convective section I; в) boiler 2, convective section II; д) boiler 2, convective section I (author's figure)

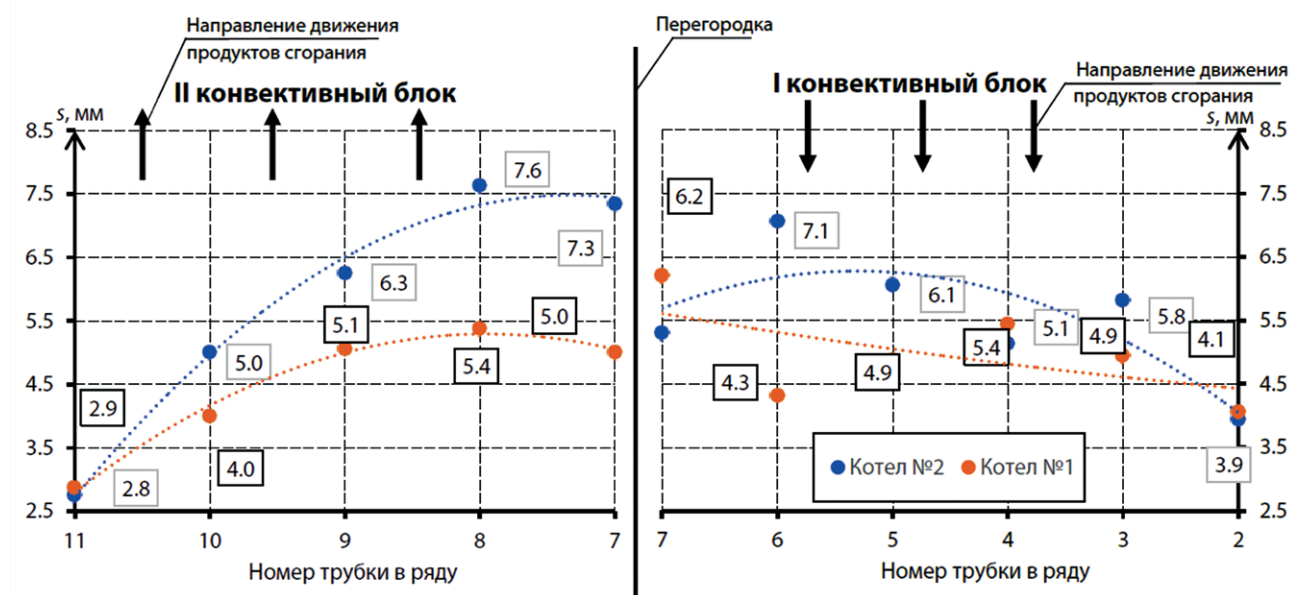


Рис. 5. Зависимости осредненных значений толщины отложений золы на конвективных трубах по длине нижнего ряда обследованных труб для котлов 1 и 2 (рисунок автора)

Fig. 5. Dependencies of the average ash deposit thickness values against the longitudinal position along the lower row of examined convective pipes for boilers 1 and 2 (author's figure)

по ширине конвективных блоков котлов 1 и 2 при приближении к разделительной межсекционной перегородке конвективных блоков и стенкам.

В случае исследования котла 2 максимальное значение осредненной толщины отложений среди всех обследованных трубок составило 7.6 мм на трубе 8, которая располагается первой от разделительной перегородки в пучке и находится в зоне с движением продуктов сгорания снизу вверх. Также видно, что для пучка труб, через которые проходит поток продуктов сгорания снизу вверх, зависимость осредненной толщины отложений от ширины конвективного блока близка к линейной, с минимумом для трубки 11 в нижнем ряду, равным 2.8 мм. Разница между максимальным (труба 8) и минимальным (труба 11) значением осредненной толщины золовых отложений в части конвективного блока труб котла 2 с движением потока продуктов сгорания снизу вверх равна 4.7 мм.

В случае исследования котла 1 максимальное значение средней толщины отложений среди всех обследованных труб составило 5.8 мм (на 23.7 % меньше максимального значения, выявленного у труб котла 2) на трубке 7, в зоне, располагающейся перед разделительной перегородкой в области направления движения дымовых газов сверху вниз. Также обнаружен скачок осредненной толщины отложений (5.4 мм) на трубе 4 нижнего ряда котла 1.

Из рис. 5 видно, что после достижения максимальных значений осредненной толщины золовых отложений для обоих котлов вблизи разделительной перегородки осредненная толщина отложений по ширине конвективного блока изменяется. Тенденции уменьшения и увеличения осредненной толщины отложений в зоне движения продуктов сгорания сверху вниз у котла 1 и у котла 2 не совпадают. У котла 1 в нижнем ряду труб наблюдается только один скачок увеличения осредненной толщины отложений, а у котла 2 в нижнем ряду трубок наблюдается два скачка увеличения осредненной толщины отложений.

Из рис. 6 видно, что толщина золовых отложений на боковых сторонах конвективных трубок в зависимости от места расположения трубки в нижнем ряду имеет ярко выраженную неравномерность. Выявлено, что на боковых сторонах (в точках проведения измерения Т.5 и Т.1) конвективных труб 11 для двух обследованных котлов толщина золовых отложений находится в диапазоне от 2.5

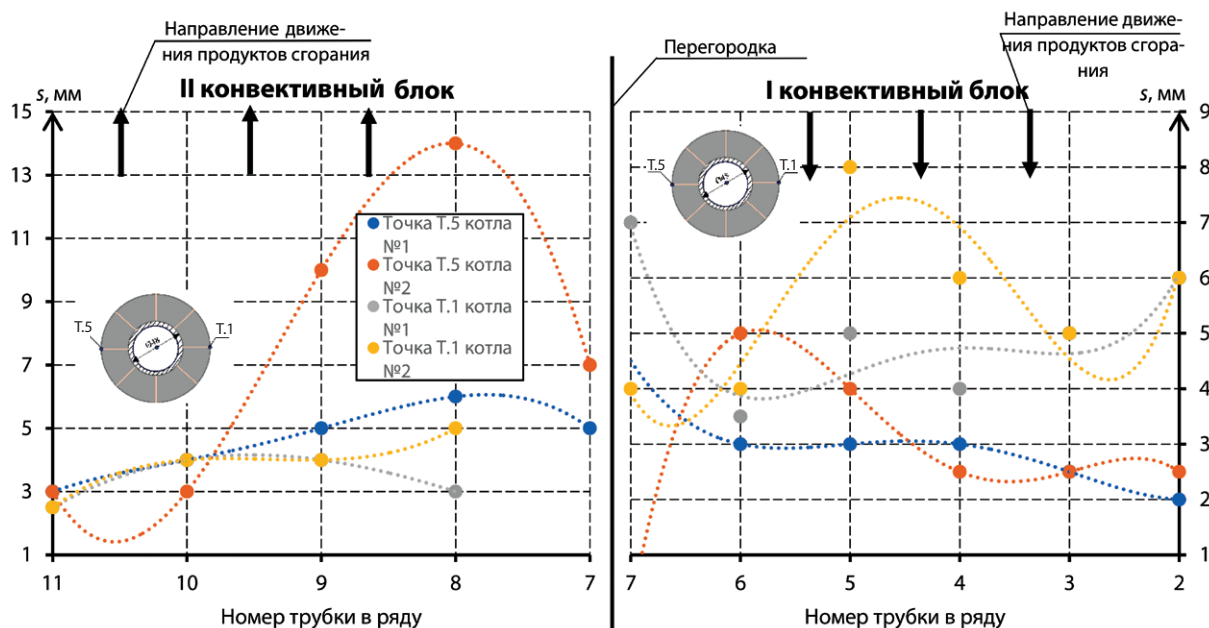


Рис. 6. Зависимости толщины отложений золы по ширине конвективного блока для точек Т.1 и Т.5
(рисунок автора)

Fig. 6. Dependences of ash deposit thickness across the width of the convective section for measurement points T.1 and T.5 (author's figure)

до 3 мм. Значения толщины золовых отложений в точке измерения Т.1 котлов 1 и 2 на трубках 9–11, а также на трубках 2 и 3 полностью совпадают.

Изменение толщины золовых отложений в точке измерения Т.5 котлов 1 и 2 для всех труб нижнего ряда имеет следующую тенденцию: увеличение толщины слоя до трубки 8 (первая трубка после разделительной перегородки), а затем уменьшение толщины золовых отложений при приближении к стенкам конвективного блока. Для точки измерений Т.1 зависимости имеют тенденции как к увеличению значения толщины золовых загрязнений, так и к уменьшению с приближением к стенкам конвективного блока. Максимальное значение толщины золовых отложений наружной поверхности труб, равное 14 мм, зафиксировано для Т.5 котла 2 на трубке 8, что больше значения, зафиксированного в аналогичной точке измерения на трубке 8 котла 1 на 8 мм. Значения толщин отложений в точке измерения Т.5 у котла 2 на трубках 6–9, а у котла 1 на трубках 7–11 больше значений толщин отложений в точке Т.1 у этих труб. Начиная с труб 5 обоих котлов и далее с приближением к стенке конвективного блока значения толщины золовых отложений на боковых частях труб в точках Т.1 больше, чем в точках Т.5 не менее чем на 1 мм.

Из рис. 7 видно, что значения толщин отложений для крайних исследованных трубок в нижнем ряду (трубки 2 и 11) находятся в небольшом диапазоне толщин – от 2.5 до 4 мм и от 2 до 3 мм соответственно, а толщина золовых отложений на поверхности других трубок в ряду имеет разброс от максимального значения в 14 мм (трубка 9 котла 2, Т.4) до минимального значения толщины на тыльной стороне трубки, равного 1.5 мм (трубка 6 котла 1, Т.4). Необходимо отметить, что толщина золовых отложений на трубке 11 в точке Т.4 (левая часть тыльной стороны поверхности трубки) котла 2 имеет одинаковое значение с Т.2 (правая часть тыльной стороны поверхности трубки) на трубке 11 другого котла, но при рассмотрении изменения толщины с приближением к стенке конвективного блока заметно, что толщина отложений при сравнении слоев на трубках 10 и 11 значительно увеличилась в точке Т.4 – на 69.2 %, тогда как в точке Т.2 – на 20 %. Разница значений на тыльной стороне трубки 10 котла 2 в точках измерения Т.3 и Т.4 равна 7 мм (53.8 %). Значительные отклонения в вели-

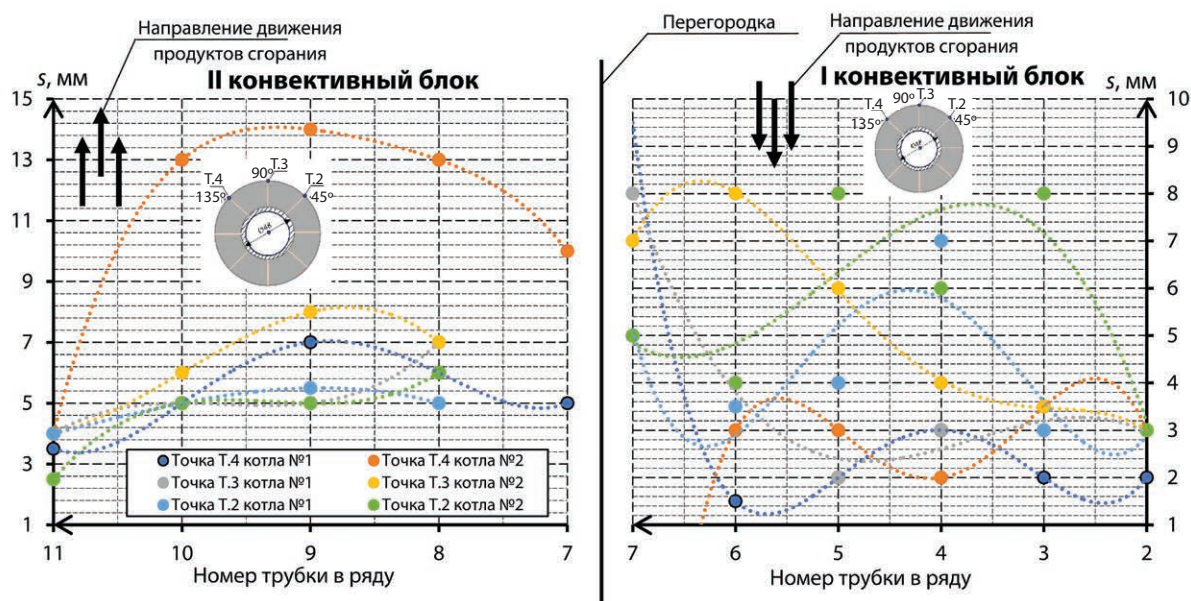


Рис. 7. Зависимости значений толщины отложений золы по ширине конвективного блока для точек T.2, T.3, T.4 (рисунок автора)

Fig. 7. Dependences of ash deposit thickness across the width of the convective section for measurement points T.2, T.3, and T.4 (author's figure)

чинах толщины золовых отложений в точке измерения T.4, которые прослеживаются и далее (вплоть до трубки 7) свойственны только котлу 2, в остальных рассмотренных случаях подобного разброса значений толщин слоя золы не замечено.

Сравнивая толщину слоев загрязнений после трубки 6 и далее по мере приближения к стенкам конвективного блока, заметно, что зависимости толщины отложений в точках T.2 в котлах 1 и 2 имеют резкие изменения толщины отложений (уменьшения и увеличения величин). Например, при сравнении толщин загрязнений на трубках 5 и 6 в T.2 изменение значений толщины в сторону ее увеличения составило 4 мм, а для этих же трубок в T.4 изменение толщины составило всего 0.5 мм.

Значения толщины отложений в точке измерений T.4 на трубках котла 1 совпадают со значениями для трубок 9 и 10 котла 2 в точках измерения T.2, а также со значениями для трубок 10 и 11 котла 1 в точках T.2.

Из рис. 8 видно, что разброс результатов измерений толщины отложений в точке T.8 у труб 5–11 котла 2 имеет ярко выраженный скачкообразный вид. Результаты измерений с менее выраженным скачкообразным видом имеют точки только для некоторых пар сравниваемых трубок. В отличие от зависимостей (рис. 6, 7), построенных для боковых и тыльной частей поверхности трубок, в случае омывания потоком фронтальной стороны трубок у зависимостей толщины золовых отложений наблюдается тенденция схожего (учитывая локальные перепады толщины золы от трубки к трубке) увеличения толщины золовых загрязнений с приближением к стенке конвективного блока. Это может быть объяснено тем, что фронтальная сторона трубок в случае с трубками 2–7 является подветренной по отношению к направлению движения потока продуктов сгорания в отличие от трубок 8–11, для которых фронтальная сторона является наветренной по отношению к направлению движения потока продуктов сгорания. За подветренной стороной труб обычно находится зона малой турбулентности с низкими скоростями потока и большей подверженностью процессам осаждения частиц летучей золы.

Зависимость толщины отложений золы на трубках котла 2 в точке измерений T.7 имеет параболическую форму снижения толщины отложений между трубками 3–6, где максимальные значения

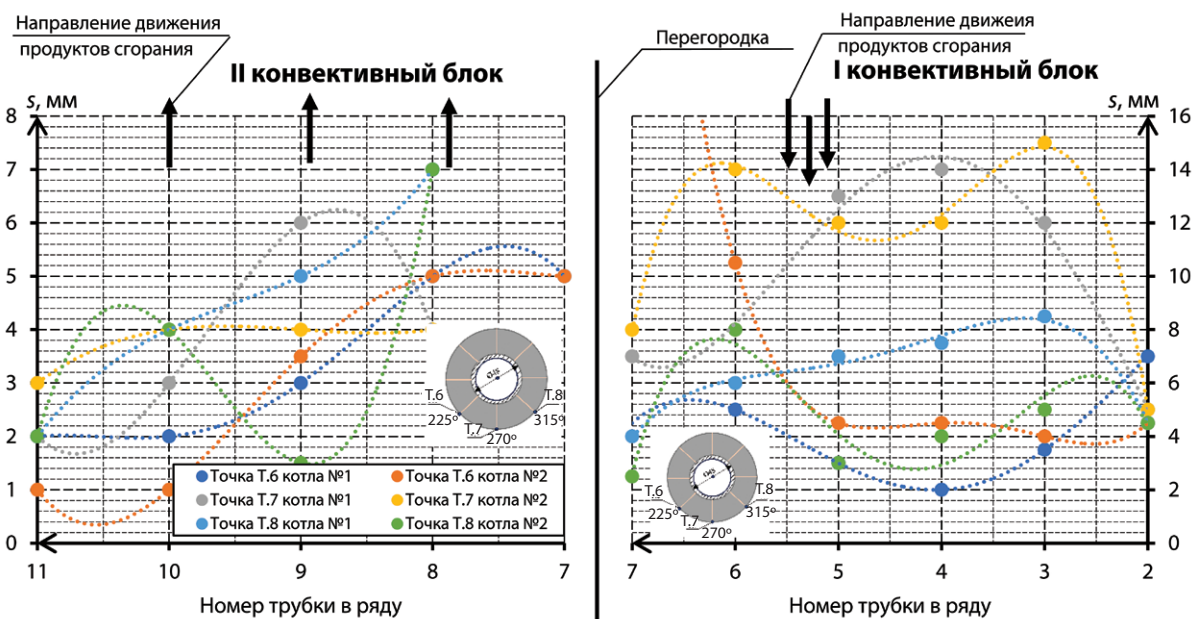


Рис. 8. Зависимости значений толщины отложений золы по ширине конвективного блока для точек Т.6, Т.7, Т.8 (рисунок автора)

Fig. 8. Dependences of ash deposit thickness across the width of the convective section for measurement points T.6, T.7, and T.8 (author's figure)

толщины – 14 и 15 мм, а минимальное – 12 мм. Далее наблюдается резкое снижение толщины слоя до 5 мм (на 66.7 %) при сравнении ее значений с трубами 2 и 3. В то же время у котла 1 наблюдается иная картина распределения толщин: от трубы 6 к трубке 4 выявлено увеличение толщины отложений – с 8 до 14 мм (рост на 6 мм, или на 42.8 %), а затем от трубы 4 до трубы 2 заметно уменьшение толщины слоя золы – с 14 до 5 мм (падение на 9 мм, или на 64.3 %).

Методика, примененная в этой работе, может быть использована во время проведения обследований водотрубных котлов подобной конструкции при наличии ревизионных лючков либо съемных панелей обшивки, позволяющих получить удобный доступ для проведения замеров без механического разрушения накопившихся слоев отложений на близкорасположенных к лючкам рядах труб. По полученным в ходе замеров значениям толщины золовых отложений можно произвести расчеты действительного сопротивления теплопередаче накопившихся на трубках слоев золы, а также действительной температуры стенок конвективных труб; оценить тепловую эффективность работы поверхности нагрева, сравнив с проектными значениями; оценить экономичность работы действующего оборудования с принятыми режимными параметрами; спрогнозировать эффективность применяемого способа очистки поверхностей труб конвективных блоков от загрязнений, периодичности его проведения и в случае необходимости внести корректировки в планы проведения мероприятий по очистке, что позволит добиться эффективной и надежной работы котлоагрегатов. Полученные осредненные значения толщин золы можно использовать для уточнения коэффициента загрязнения, который используется при выполнении поверочных тепловых расчетов по нормативному методу.

4. Заключение / Conclusions

1. Полученные данные о толщинах золовых отложений, сформировавшихся в течение отопительного сезона на трубках конвективных пучков котлов КВу-1.0, свидетельствуют о загрязнении конвективных теплообменных поверхностей.

2. Анализ формы отложений позволил выявить трубки с наибольшим и наименьшим слоями отложений золы в различных частях поверхности труб. Наименьшие осредненные значения толщин отложений зафиксированы у первых и последних трубок в ряду примыкающих к стенкам конвективных блоков. Найдена зависимость увеличения осредненной толщины отложений от крайних трубок в ряду, примыкающих к стенкам, до трубок, располагающихся в непосредственной близости к разделительной перегородке. Подтверждено, что на поверхностях трубок, обращенных в сторону набегающего потока продуктов сгорания, толщина отложений меньше по сравнению с подветренной поверхностью трубки, что свидетельствует о влиянии низкорейнольдсовых течений газового потока в зоне тыльной стороны трубок.
3. Экспериментальное исследование нижнего ряда труб конвективных блоков двух действующих котлоагрегатов позволило построить профили золовых отложений на поверхности трубок, получить зависимости осредненной толщины золовых отложений по ширине конвективных блоков для точек измерений (рис. 2d), которые в дальнейшем помогут уточнить значения коэффициентов загрязнения при составлении тепловых расчетов водотрубных котлов, работающих на угольном топливе.
4. В дальнейшем полученные экспериментальные данные планируется использовать для верификации разработанных численных моделей для прогнозирования формы золовых отложений на конвективных трубках водотрубного котла типа КВу-1.0.



Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Войцеховская О. К., Каширский Д. Е., Егоров О. В., Шефер О. В. Определение длин волн для дистанционного зондирования горячих продуктов сгорания топлив при атмосферных условиях. *Известия вузов. Физика*. 2015;58(10/3):132–134. <https://www.elibrary.ru/whancp>
2. Перескокова С. А., Копылова Н. С., Яковлева А. Ю. Повышение эффективности конструкции твердотопливных котлов со слоевыми топками. *Вестник гражданских инженеров*. 2014;(6):164–168. URL: <https://www.elibrary.ru/tflogj>
3. Шкаровский А. Л., Гримитлин А. М., Таурит В. Р. Совершенствование использования твердого топлива при слоевом способе сжигания. *Вестник гражданских инженеров*. 2022;(4):125–131. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-4-5-15>
4. Yanguo Zhang, Qinghai Li, Hui Zhou. Chapter 6. Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. In: *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*. Elsevier; 2016. P. 173–191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800966-6.00006-5>
5. Yanquan Liu, Leming Cheng, Jieqiang Ji, Qinhui Wang, Mengxiang Fang. Ash deposition behavior of a high-alkali coal in circulating fluidized bed combustion at different bed temperatures and the effect of kaolin. *RSC Advances*. 2018;8(59):33817–33827. <https://doi.org/10.1039/C8RA05997G>
6. Варданян М. А. Ресурсосберегающая и природоохранная деятельность теплоэнергетического предприятия. *Вестник гражданских инженеров*. 2019;(6):228–234. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-6-228-234>
7. Заворин А. С., Раков Ю. Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах. *Известия Томского политехнического университета*. 2005;(1):144–150. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/567/1/bulletin_tpu-2005-308-1-31.pdf
8. Yang Xin. *Development of ash deposition prediction models through the CFD methods and the ash deposition indice: PhD thesis*. Sheffield; 2016. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/17127/1/Thesis-xy-2017.pdf>
9. Белый В. В., Порозов С. В., Васильев В. В., Дектерев А. А., Тэпфер Е. С. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт. *Теплофизика и аэромеханика*. 2007;14(2):299–312. URL: https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120102&ARTICLE_ID=126901

10. Дорфман Ю. В., Горячих Н. В., Батухтин А. Г. Модели поведения углей при разных способах его сжигания и их применение. *Вестник Читинского государственного университета*. 2010;(9):119–125. URL: <https://www.elibrary.ru/nchvmj>
11. Заворин А. С., Раков Ю. Я. Численное моделирование процессов сжигания углей с учетом их минеральной части: состояние вопроса. *Известия Томского политехнического университета*. 2004;(1):122–126. URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/221/1/bulletin_tpu-2004-307-1-24.pdf
12. Муканов Р. В., Свинцов В. Я. Разработка и исследование новых методов сжигания жидкого топлива. *Вестник гражданских инженеров*. 2017;(1):182–191. URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/article/razrabotka-i-issledovanie-novyh-metodov-szhiganiya-zhidkogo-topliva>
13. Marangwanda G. T., Madyira D. M., Babarinde T. O. Coal combustion models: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;(1378):032070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032070>
14. Фомичев А. С., Корецкий Д. А., Заворин А. С. Прогнозирование отложений угольной золы в топках энергетических котлов на основе численного моделирования. *Известия Томского политехнического университета*. 2013;(4):35–38. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/4746?mode=full>
15. Отс А. А. *Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канско-ачинских углей*. Москва: Энергия; 1977. 312 с. URL: <https://thelibrary.net/2328232-processy-v-parogeneratorah-pri-szhiganii-slancev-i-kansko-achinskih-uglej.html>
16. López Ch., Unterberger S., Maier J., Hein K. R. G. Overview of actual methods for characterization of ash deposition. In: *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, ECI Symposium Series, Santa Fe, NM, USA, 18–22 May 2003*. <https://dc.engconfintl.org/heatexchanger/38>
17. Kowalczyk-Juśko A. The influence of the ash from the biomass on the power boiler pollution. *Journal of Ecological Engineering*. 2017;18(6):200–204. <https://doi.org/10.12911/22998993/76897>
18. Zhiming Xu, Jinhui Li, Zhimin Han. Numerical study of particle fouling deposition on heat transfer surface. *Energy Storage and Saving*. 2022;1(1):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2021.11.001>
19. Шерин Е. А. Экономико-географический анализ развития угольного цикла производств Кузбасса. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. 2014;(10):115–124. URL: <https://izvestiageo.isu.ru/ru/article?id=74>

References

1. Voitsekhovskaya O. K., Kashirskii D. E., Egorov O. V., Shefer O. V. Determination of wavelengths for remote sensing of hot combustion products of fuel under atmospheric conditions. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015;58(10/3):132–134. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/whancp>
2. Pereskokova S. A., Kopylova N. S., Yakovleva A. Y. Improving the design efficiency of solid fuel boilers with grate furnaces. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014;(6):164–168. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/tflogj>
3. Shkarovskiy A. L., Grimitlin A. M., Taurit V. R. Improving the use of solid fuel in the layered combustion method. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022;(4):125–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-4-5-15>
4. Yanguo Zhang, Qinghai Li, Hui Zhou. Chapter 6. Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. In: *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*. Elsevier; 2016. P. 173–191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800966-6.00006-5>
5. Yanquan Liu, Leming Cheng, Jieqiang Ji, Qinhui Wang, Mengxiang Fang. Ash deposition behavior of a high-alkali coal in circulating fluidized bed combustion at different bed temperatures and the effect of kaolin. *RSC Advances*. 2018;8(59):33817–33827. <https://doi.org/10.1039/C8RA05997G>
6. Vardanyan M. A. Resource-saving and environmental activities of the heat power enterprise. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019;(6):228–234. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-6-228-234>
7. Zavorin A. S., Rakov Yu. Ya. Phenomenological models of formation of pipe deposits in boilers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2005;(1):144–150. (In Russ.) URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/567/1/bulletin_tpu-2005-308-1-31.pdf
8. Yang Xin. *Development of ash deposition prediction models through the CFD methods and the ash deposition indice: PhD thesis*. Sheffield; 2016. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/17127/1/Thesis-xy-2017.pdf>
9. Bely V. V., Porozov S. V., Vasiliev V. V., Dekterev A. A., Tepfer E. S. Heat exchange investigation and modernization of furnace of P-67 boiler of 800 MW unit. *Thermophys. Aeromech.* 2007;14:287–299. <https://doi.org/10.1134/S0869864307020151>

10. Dorfman Yu., Goryachikh N., Batukhtin A. Models of conduct of coals with different burning regimes and their application. *Chita State University Journal*. 2010;(9):119–125. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/nchvmj>
11. Zavorin A. S., Rakov Y. Ya. Numerical modelling of coal burning processes with respect to their mineral content. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2004;(1):122–126. (In Russ.) URL: https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/221/1/bulletin_tpu-2004-307-1-24.pdf
12. Mukanov R. V., Svintsov V. Ya. Development and research of new liquid fuel combustion techniques. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017;(1):182–191. (In Russ.) URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/article/razrabotka-i-issledovanie-novyh-metodov-szhiganiya-zhidkogo-topliva>
13. Marangwanda G. T., Madyira D. M., Babarinde T. O. Coal combustion models: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;(1378):032070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032070>
14. Fomichev A. S., Koretskiy D. A., Zavorin A. S. Prediction of coal ash deposits in power boiler furnaces based on numerical modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013;(4):35–38. (In Russ.) URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/4746?mode=full>
15. Ots A. A. *Processes in steam generators during combustion of oil shale and Kansk-Achinsk coal*. Moscow: Energiya; 1977. 312 p. (In Russ.) URL: <https://thelibrary.net/2328232-processy-v-parogeneratorah-pri-szhiganii-slancev-i-kansko-achinskih-uglej.html>
16. López Ch., Unterberger S., Maier J., Hein K. R. G. Overview of actual methods for characterization of ash deposition. In: *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, ECI Symposium Series, Santa Fe, NM, USA, 18–22 May 2003*. <https://dc.engconfintl.org/heatexchanger/38>
17. Kowalczyk-Juśko A. The influence of the ash from the biomass on the power boiler pollution. *Journal of Ecological Engineering*. 2017;18(6):200–204. <https://doi.org/10.12911/22998993/76897>
18. Zhiming Xu, Jinhui Li, Zhimin Han. Numerical study of particle fouling deposition on heat transfer surface. *Energy Storage and Saving*. 2022;1(1):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2021.11.001>
19. Sherin E. A. Economic geographical analysis of the development of coal production cycle in Kuzbas. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*. 2014;(10):115–124. (In Russ.) URL: <https://izvestiageo.isu.ru/ru/article?id=74>



Информация об авторе

Каштанов Дмитрий Иванович, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, dmitrii.kas@gmail.com

Information about the author

Dmitriy I. Kashtanov, Postgraduate Student in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation, dmitrii.kas@gmail.com

Получена 13 октября 2025 г., одобрена 20 ноября 2025 г., принята к публикации 28 ноября 2025 г.

Received 13 October 2025, Approved 20 November 2025, Accepted for publication 28 November 2025