© Е.А. Бойко, И.В. Загородний

(cc) BY

УДК 662.61 **DOI:10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116**

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ШЛАКОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА КОТЛОАГРЕГАТА ПРИ СЖИГАНИИ НЕПРОЕКТНЫХ ТОПЛИВ

Е.А. Бойко, И.В. Загородний

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме: *ЦЕЛЬ. Рассмотреть проблемы шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата БКЗ-420-140 с твердым шлакоудалением Абаканской ТЭЦ при сжигании непроектных топлив. МЕТОД. При рассмотрении проблем шлакования использовались комплексные (экспериментально-расчетные) исследования факторов и условий шлакования поверхностей нагрева котельного агрегата при сжигании углей переменного качества в широком диапазоне изменения их технических характеристик и состава минеральной части. РЕЗУЛЬТАТЫ. Получены качественные и количественные параметры оценки шлакующих свойств непроектных углей и их поведения в реальных условиях работы радиационных, полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева с учетом их режимных и конструктивных особенностей. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. По результатам комплексных исследований получено,что к числу наиболее рациональных мероприятий по использованию непроектных углей на котле БКЗ-420-140 ТШУ Абаканской ТЭЦ относятся модернизация применяемых средств очистки (обдувочных аппаратов) и системы их активации, а также научно-обоснованный выбор оптимального соотношения смеси проектного и непроектного топлива по условию минимальной интенсивности процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева. Анализшлакующих и загрязняющих свойств непроектных углей позволяет выполнять прогноз изменения характеристик тепловой эффективности поверхностей нагрева и разработать ряд практических рекомендаций по оптимизации параметров работы средств очистки, установленных на котле.*

Ключевые слова: *непроектные угли, котельный агрегат, поверхности нагрева, шлакование, экспертная оценка, тепловой расчет.*

Для цитирования: 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.

INTEGRATED RESEARCH OF SLAGING INTENSITYOF THE BOILER UNIT HEATING SURFACESWHEN BURNING NON-PROJECT FUELS

EA. Boiko, IV. Zagorodnii

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: *THE PURPOSE. Comprehensive research of the slagging intensity is the heating surfaces of the BKZ-420-140 boiler unit with solid slag removal at the Abakan CHP when burning non-project fuels. The relevance of the work is due to the technical necessity and economic feasibility of conversion boiler units to combustion of non-design coals. METHODS.*

The problem has been analyzed by methodology for conducting complex tests, measurements and processing of experimental data, as well as the results of experimental and computational studies of a boiler unit when operating on coals of various qualities. RESULTS. Qualitative and quantitative parameters for assessing the properties of off-design coals and their behavior in real operating conditions of radiation, semi-radiation and convective conditions, taking into account their modes and design functions, have been obtained. CONCLUSION: A computational analysis of the operating modes of boiler units when burning non-design fuels showed that a promising technology for involving non-design coals in the fuel and energy balance of a thermal power plant is providing a scientifically based mixture of design and non-design fuels.Analysis of the slagging and polluting properties of non-design coals makes it possible to predict changes in the characteristics of the thermal efficiency of heating surfaces and to develop many practical recommendations for optimizing the parameters of the cleaning equipment installed on the boiler.Also, mixtures of fuels were determined for which the wall temperatures of the metal of the outlet stack of the superheater increase, which significantly reduces the strength characteristics of the surface.The assessment and prediction of the reliability of the heating surface is carried out by calculating the temperature of the metal wall in the most heat-stressed place.

Key words: *non-standard coals, boiler unit, heating surfaces, slagging, expert review, thermal calculation.*

For citation: Boiko EA,. Zagorodnii IV. Integrated research of slaging intensityof the boilerunit heating surfaceswhen burning non-project fuels. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2020;22(6):101-116. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-101-116.

Введение

Одним из основных рынков, участником, которого выступают генерирующие энергетические предприятия, является рынок топливных ресурсов, а доля топливной составляющей в себестоимости энергии фактически превышает 50%. В связи с этим обеспечение конкурентоспособности энергетических компаний в значительной степени зависит от детального изучения проблем топливоиспользования.

Ранее все тепловые электростанции (ТЭС) проектировались на сжигание углей конкретных месторождений (как правило, близлежащих), поэтому в новых конкурентных условиях рынка углепоставок весьма актуален поиск технологических и экономических критериев взаимозаменяемости углей. Эта информация необходима при построении энергогенерирующими предприятиями эффективной системы управления издержками и бизнес-планирования [1, 2].

Наиболее остро при сжигании непроектных углей на котельных агрегатахТЭС встаёт проблема шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, что приводит к снижению паропроизводительности котельного агрегата, росту затрат на очистку и расшлаковку поверхностей нагрева, снижению надёжности работы теплообменных поверхностей [3,4].

Таким образом,для обеспечения экономичной и надёжной бесшлаковочной работы котельных агрегатов при изменении качества сжигаемого топлива и режимов работы оборудования имеют большую значимость работы по проведению комплексных исследований процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов при сжигании непроектных топлив. Для достижения вышеуказанной цели требуется решение следующих задач [5]:

– проведение экспериментально-расчётных исследований процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева при сжигании различных непроектных углей;

– выполнение экспертной и расчётной оценки влияния качества непроектных углей на шлакующие и загрязняющие показатели работы котельных агрегатов;

– проведение исследование тепловой эффективности работы поверхностей нагрева котельных агрегатов при сжигании непроектных;

– выполнение аналитических исследований процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева с учётом режимных и конструктивных особенностей котельных агрегатов, а также расчётного анализа температурных режимов работы поверхностей нагрева котлоагрегатов при сжигании непроектных углей с последующей оценкой надёжности их работы.

Объект и методы исследования

Объектом для отработки методики комплексных исследований послужил вертикальный водотрубный паровой котел с естественной циркуляцией и твердым шлакоудалением БКЗ-420-140Абаканской ТЭЦ, работающий на проектном бородинском угле, с прогнозом использования широкой гаммы непроектных топлив различных месторождений: канский, черногорский, изыхский, харанорский, назаровский, черногорский отсев, элегестинский и березовский, – а также нескольких соотношений смесей непроектных углей с проектным топливом.

Испытания котельного агрегата проводились по стандартной методике [6]. Основные штатные параметры работы котельного агрегата фиксировались по приборам щита управления котлом. Присосы воздуха в топку и газоход пароперегревателя определялись упрощенным методом Южтехэнерго в зависимости от поддерживаемого в топке разрежения. Присосы холодного воздуха в конвективную шахту котла оценивались по результатам газового анализа. Температуры газов по высоте топки замерялись с помощью оптического пирометра «*Testo*».

Шлакующие свойства топлива определялись по методике ВТИ с помощью неохлаждаемых зондов [7]. Использование неохлаждаемых зондов допустимо при изучении влияния отдельных факторов на интенсивность образования и свойства первичных отложений с высоким содержанием оксидов железа. Первичные отложения, отобранные с помощью неохлаждаемых зондов, качественно характеризуются теми же свойствами, что и отобранные с поверхностей нагрева котла.

Исследование свойств и условий образования рыхлых отложений осуществлялось методом, разработанным ВТИ, с использованием водоохлаждаемых переносных торцевых пробоотборников со съёмной бобышкой [8]. Возможность изменения продолжительности выдержки пробоотборников в газоходе позволяет проследить процесс образования отложений, что является важным с точки зрения механизма их образования.

Образование отложений золовых частиц на низкотемпературных поверхностях нагрева изучалось с помощью зонда, представляющего собой, трубу в трубе, помещаемого в газоход котла. С помощью таких зондов проводилось исследование влияния на интенсивность отложений различных режимных факторов (коэффициента избытка воздуха, температуры стенки и др.).

Для изучения механизма образования отложений путем анализа фазовых превращений, происходящих в летучей золе, использовались специальные методы лабораторных исследований минеральной части топлива, летучей золы и отложений.

Вещественный (минералогический) состав, или форма соединений в минеральной части, в значительной степени определяет способность золы к спеканию, образованию легкоплавких эвтектических смесей. Для исследования минерального состава использовалось несколько методов: оптической и электронной микроскопии; дифференциально-термографический анализ; анализ содержания и состава водорастворимых соединений; кристаллооптические исследования. Характер отложений на поверхностях нового типа изучался с помощью байпасных газоходов.

Целью проводимых испытаний в период опытного сжигания проектного и непроектного угля являлось:

– получение характеристик работы котла в период опытного сжигания – основных тепловых характеристик работы оборудования для определения бесшлаковочных режимов эксплуатации котлоагрегатов;

– выполнение балансовых испытаний котлоагрегатадля определения основных показателей работы котла при сжигании проектного и непроектного угля и формирования режимной карты.

При изучении интенсивности процессов шлакования топочной камеры и пароперегревателей котельного агрегата были использованы основные положения методики УралВТИ и УрФУ (УПИ) [9], согласно которой основными характеристиками шлакующих свойств углей являются: температура начала шлакования, выше которой наблюдается неограниченный рост вторичных отложений и прочность первичных отложений.

Учитывалось, что температура начала шлакования не связана с плавкостными характеристиками золы, а зависит, прежде всего, от химического состава минеральной части топлива. Данная температура определяется с использованием неохлаждаемых зондов при проведении тепловых испытаний действующих котельных агрегатов или может быть получена расчётным путем [10].

Для определения зависимости интенсивности шлакования от температуры газов золошлаковые отложения взвешивались после извлечения зонда из газохода, снятые с участка зонда длиной 200–250 мм. Скорость образования отложений, приведённая к номинальной нагрузке, рассчитывается по методике ВТИ.

Оценка шлакующих и загрязняющих свойств (ранжирование) углей выполнена с использованием показателей, определяемых по химическому составу зольного остатка, как для отдельных проб, так и для среднего состава (по программе ВТИ-УралВТИ«*Coral*») [10].Экспертная оценка шлакующих и загрязняющих свойств энергетических углей основана на анализе поведения минеральной части твёрдых топлив при пылеугольном сжигании и выполняется по следующим параметрам:

– рейтингу топлива, отражающему качественную оценку склонности топлива к образованию золовых отложений и шлакованию поверхностей нагрева;

– температуре начала шлакования;

– предельно допустимым значениям (по условиям шлакования и загрязнения поверхностей) расчётных реперных температур газов в котле и тепловых напряжений сечения топки.

Шлакующие и загрязняющие свойства топлив определяются и оцениваются в зависимости от физико-химических характеристик топлива, состава его минеральной части, а также от условий и режима сжигания.

Рейтинг топлива оценивается по следующим основным показателям загрязнения:

– склонности минеральной части топлива к образованию на поверхностях нагрева наиболее трудноудаляемых видов золовых отложений (железистых, натриевых, сульфатно-кальциевых);

– склонности минеральной части топлива к шлакованию топочных экранов, радиационных и полурадиационных поверхностей нагрева.

Ранжирование топлив осуществляется по четырём группам рейтинга: низкий (Н), средний (С), высокий (В) и очень высокий (ОВ), качественно определяющим характер возможного загрязнения.

Группа рейтинга определяется для каждого показателя загрязнения по индивидуальным безразмерным шкалам (коэффициентам) рейтинга (R). Расчёт коэффициентов рейтинга, а также анализ влияния указанных факторов на значения рейтинга проводится по зависимостям коэффициентов рейтинга от расчётных рейтинговых параметров (Р). Рейтинговые параметры представляют собой безразмерные комплексы, рассчитываемые по содержанию тех элементов состава топлива, компонентов минеральной части и параметров котла, которые определяют рассматриваемый показатель загрязнения.

Сопоставление анализируемого и нормированных топлив по показателям загрязнения позволяет определить топлива-аналоги, обеспечивающие при сжигании примерно такой же характер загрязнения поверхностей нагрева.

Оценка количественных показателей, характеризующих шлакующие свойства энергетических топлив и используемых при проектировании и наладке котлов, производились для следующих температурных реперов:

– температуре начала шлакования (зависит от состава минеральной части топлива и определяется по базовой зависимости, полученной по экспериментальным данным для нормированных топлив);

– предельно допустимым значениям (по условиям шлакования и загрязнения поверхностей нагрева) расчётных температур газов: температуре на выходе из топки и на входе в конвективную шахту котла.

Оценка предельно допустимых (по условию шлакования) значений тепловых напряжений топки проводилась по реальным параметрам котла для следующих зон и сечений топки:

– общего поперечного сечения топки (зависит от рейтингового параметра P_{fe});

– поперечного сечения топки для зоны от холодной воронки до нижнего яруса горелок(зависит от рейтингового параметра $P_{шп}$);

– поперечного сечения зоны активного горения (зависит от рейтингового параметра $P_{шп}$).

Результаты

Эмпирические зависимости для расчёта отдельных параметров, характеризующих шлакующие и загрязняющие свойства энергетических топлив, получены на основе обобщения результатов экспериментальных исследований поведения минеральной части ряда характерных типов топлив (так называемых *нормированных топлив*). По этим данным построены базовые зависимости указанных параметров от физико-химических характеристик топлив и его минеральной части, которые приведены к единым условиям сжигания топлив – *нормированным параметрам котла*.

Получаемые при нормированных параметрах оценки оказываются в большинстве случаев достаточно представительными для прогнозирования шлакующих и загрязняющих свойств топлив и при других режимах сжигания. Уточнение шлакующих и загрязняющих свойств анализируемого топлива осуществляется при учете реальных параметров котла.

Результаты экспертной оценки шлакующих свойств углей и смесей представлены в табл.1.

Анализ шлакующих свойств минеральной части рассматриваемых углей показал, что наивысшая склонность к образованию наиболее прочных железистых отложений, образующихся в основном в топочной камере (см. индексы шлакования топочных экранов и полурадиационных поверхностей нагрева) котла относятся канский и назаровский угли. Из числа смесей, наибольшую склонность к образованию железистых отложений проявляет в широком диапазоне соотношение бородинского и черногорского углей.

С точки зрения образования натриевых отложений все рассматриваемые угли и их смеси относятся к классу нешлакующих топлив. Максимальные значения данный индекс принимает для каменных углей изыхского и элегестинского углей.

Склонность к образованию кальциевых отложений, косвенно характеризующих прочность отложений, проявляется в первую очередь у бурых углей: бородинского, канского, берёзовского и назаровского углей.

Данные выводы подтверждаются расчётными значениями температуры шлакования и допустимой температуры газов на выходе из топочной камеры котла по условию шлакования.

Для выполнения сравнительной оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов предложено в качестве основного показателя

использовать коэффициент тепловой эффективности – ψ. Данный коэффициент является наиболее представительным и универсальным эмпирическим показателем, характеризующим режимные параметры протекания сложных тепло- и физикохимических процессов в газоходах котельного агрегата и его конструктивные особенности, численное значение которого тождественно отражает величину термического сопротивления трубной поверхности[11].

Таблица 1

Результаты экспертной оценки шлакующих свойств углей и их смесей

уголь	Показатели								
	fe	na	ca	тэ	шп	шл	т"	S	iO$_2$экв
Бородинский	,55	,23	,73	,75	,72	65	145	,84	2
Канский	,75	,28	,76	,86	,92	75	085	,69	3
Черногорский	,48	,32	,38	,64	,58	005	185	1	2
Изыхский	,33	,35	,45	,67	,70	70	150	1	3
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	,55	,27	,68	,75	,72	65	145	,88	2
Харанорский	,45	,27	,54	,63	,64	90	170	1	6
Назаровский	,71	,29	,84	,85	,74	005	140	/д*	0
Черногорский, отсев	,24	,30	,37	,55	,54	020	200	1	7
Бородинский (70%) + черногорский, отсев (30%)	,52	,26	,65	,73	,69	70	150	,98	6
Бородинский (50%) + Черногорский, отсев (50%)	,52	,27	,59	,72	,67	80	160	1	9
Бородинский (30%) + Черногорский, отсев (70%)	,52	,29	,51	,70	,67	90	160	1	2
Элегестинский	,54	,37	,53	,76	,74	60	140	1	4
Берёзовский	,64	,31	,82	,82	,81	90	115	/д*	5

* – по назаровскому и берёзовскому углю нет необходимых для расчёта fS данных по содержанию SO_3 в минеральной части

Шлакующие и загрязняющие свойства (метод УралВТИ-УПИ): R_{fe} – индекс загрязнения Fe-отложениями, R_{na} – индекс загрязнения Na-отложениями, R_{ca} – индекс загрязнения Ca-отложениями, $R_{тэ}$ – индекс шлакования топочных экранов, $R_{шп}$ – индекс шлакования полурадиационных поверхностей, $T_{шл}$ – температура начала шлакования, $T_{т}$" – температура на выходе из топки (допустимая).

Шлакующие и загрязняющие свойства (зарубежные оценки):fS – индекс шлакования по методу Альтмана (*Mineral*), SiO_2экв – индекс шлакования по методу "Эквивалентный

кремний";НШ – нешлакующее топливо, Ш – шлакующее топливо, СШ – сильно шлакующее топливо. Ранги свойств (качественная оценка уровня свойств):Н – низкий, С – средний, В – высокий, ОВ – очень высокий.

Данные выводы подтверждаются расчётными значениями температуры шлакования и допустимой температуры газов на выходе из топочной камеры котла по условию шлакования.

Для выполнения сравнительной оценки интенсивности шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельных агрегатов предложено в качестве основного показателя использовать коэффициент тепловой эффективности – ψ. Данный коэффициент является наиболее представительным и универсальным эмпирическим показателем, характеризующим режимные параметры протекания сложных тепло- и физикохимических процессов в газоходах котельного агрегата и его конструктивные особенности, численное значение которого тождественно отражает величину термического сопротивления трубной поверхности[11].

Оценка коэффициента тепловой эффективности произвольной поверхности нагрева осуществляется по соотношению значений фактического коэффициента теплопередачи $K_{факт}$, кВт/(м^2·К) найденному по результату экспериментальных работ из уравнения теплового баланса к аналогичному коэффициенту, рассчитанному для чистой поверхности нагрева K (без учёта коэффициента загрязнения), кВт/(м^2·К)

$$\psi = \frac{K_{факт}}{K}, \tag{1}$$

Данная сравнительная оценка выполнялась с помощью специализированных программ теплового расчета котельных агрегатов [12], а в качестве исходных данных были использованы штатные режимные параметры АСУ ТП котла. Для определения дополнительных режимных показателей, проводились балансовые испытания согласно общепринятым методикам тепловых испытаний котельных агрегатов с последующей адаптацией вычислительных программ к результатам полученных экспериментальных данных [13]. Сравнительный анализ проводился при нагрузках котла близких к номинальным.

Результаты оценки тепловой эффективности поверхностей нагрева представлены в табл. 2.

Анализ полученных данных показывает, что тепловая эффективность радиационных поверхностей нагрева котельных агрегатов снижается по мере повышения паропроизводительности котла, а конвективных наоборот повышается.

Установлено, что переход на сжигание смеси проектных и непроектных углей позволяет эффективно использовать непроектные топлива без ущерба тепловой эффективности поверхностей нагрева, а выбор требуемого соотношения проектных и непроектных углей позволит решить ряд технико-экономических проблем энергетического использования непроектных углей.

С целью проведения сопоставительного анализа основных тепловых характеристик работы котельных агрегатов при сжигании проектных и непроектных топлив была разработана методика предварительной оценки целесообразности проведения экспериментальных работ (балансовых испытаний). В качестве основных показателей тепловой работы котла по условию шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котла выбраны: температура газов на выходе из топки и температура газов перед конвективным пароперегревателем с последующим сопоставлением полученных расчётным путем температур с допустимыми значениями, полученными экспертным путем по методике *Coral*, учитывающей химический состав минеральной части угля [10, 14].

Таблица 2

Тепловая эффективность поверхностей нагрева
котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	ТК	ШПП	ПП3,4	ПП1,2	ВЭ2	ВЭ1	ТВП
Бородинский	0,406	0,516	0,640	0,727	0,766	0,764	0,89
Канский	0,394	0,344	0,625	0,711	0,758	0,76	0,89
Назаровский	0,396	0,506	0,579	0,664	0,737	0,751	0,89
Харанорский	0,419	0,537	0,695	0,804	0,816	0,784	0,89
Элегестинский	0,405	0,506	0,697	0,807	0,819	0,786	0,89
Изыхский	0,415	0,524	0,700	0,826	0,840	0,794	0,89
Берёзовский	0,399	0,460	0,592	0,676	0,742	0,754	0,89
Черногорский	0,418	0,535	0,694	0,837	0,858	0,802	0,89
Черногорский, отсев	0,428	0,525	0,693	0,838	0,861	0,803	0,89
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	0,406	0,516	0,660	0,751	0,779	0,769	0,89
Бородинский (70%) + Черногорский, отсев (30%)	0,408	0,527	0,671	0,764	0,787	0,772	0,89
Бородинский (30%) + Черногорский, отсев (70%)	0,412	0,532	0,698	0,812	0,824	0,788	0,89
Бородинский (50%) + Черногорский, отсев (50%)	0,410	0,532	0,687	0,788	0,803	0,779	0,89

Результаты тепловых расчётов котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ в качественной и количественной интерпретации представлены в таблицах 3-5, а результаты сравнительного анализа вышеуказанных температур на рис. 1-2. Установлены следующие ограничения по котельному и вспомогательному оборудованию (см. табл. 4,5):

1. Пылесистемы прямого вдувания, оснащенные инерционными сепараторами, не обеспечивают требуемую для каменных углей тонину помола готовой пыли, что приводит к повышению потерь с механической неполноты сгорания.
2. При воздушной сушке каменных углей значительно возрастает доля первичного воздуха (свыше 50%), растет температура уходящих газов. При сушке горячим и слабоподогретым воздухом необходима существенная присадка холодного воздуха.
3. Суммарная доля топочных и уходящих газов, отбираемых на сушку топлива, существенно превышает проектную (более 25%).
4. Превышение максимально допустимой температуры газов на выходе из топки (см. рис.1), что приводит к снижению бесшлаковочной мощности котла.

Таблица 3

Сравнительный анализ изменения режимных и тепловых характеристик работы котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	Низшая теплота сгорания, Q_i^r	Приведённая влажность, $W^п$	Приведённая зольность, $A^п$	Приведённое содержание серы, $S^п$	Выход летучих, V^{daf}	Взрываемость (группа)	Температура жидкоплавкого состояния, tc	Интенсивность шлакования экранов	Интенсивность шлакования ширм	Максимально-допустимая температура газов на выходе из топки	Температура начала шлакования	Закрязнение конвективных поверхностей нагрева	Износ
Бородинский	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
Канский	Δ	∇	∇	Δ	∇	□	□	Δ	Δ	∇	Δ	Δ	∇
Назаровский	∇	Δ	∇	Δ	∇	□	Δ	Δ	Δ	∇	Δ	Δ	∇
Харанорский	∇	Δ	Δ	Δ	∇	□	∇	∇	∇	Δ	Δ	∇	Δ
Изыхский	Δ	∇	∇	□	∇	□	∇	Δ	Δ	∇	∇	∇	∇
Элегестинский	Δ	∇	Δ	Δ	∇	□	Δ	∇	∇	Δ	Δ	∇	∇
Берёзовский	Δ	Δ	∇	□	∇	□	Δ	Δ	Δ	∇	Δ	Δ	∇
Черногорский	Δ	∇	Δ	Δ	∇	□	Δ	∇	∇	Δ	Δ	∇	Δ
Черногорский, отсев	Δ	∇	Δ	Δ	∇	□	Δ	∇	∇	Δ	Δ	∇	Δ
Бородинский (80 %)+ Изыхский (20%)	Δ	∇	Δ	□	∇	□	∇	□	□	□	□	∇	Δ
Бородинский (70%)+ Черногорский, отсев (30%)	Δ	∇	Δ	□	∇	□	∇	∇	∇	Δ	Δ	∇	Δ
Бородинский(30%)+ Черногорский,отсев(70%)	Δ	∇	Δ	Δ	∇	□	∇	∇	∇	Δ	Δ	∇	Δ
Бородинский (50)+ черногорский, отсев (50)	Δ	∇	Δ	□	∇	□	∇	∇	∇	Δ	Δ	∇	Δ

= – отсутствие изменений, Δ– повышение, ∇ – уменьшение показателей относительно проектного топлива.

Обсуждение

Основываясь на результатах теплогидравлических расчётов с использованием данных экспертного анализа шлакующих и загрязняющих свойств и рейтинговых оценок указанных топлив, был определен ряд мероприятий, повышающих надёжность работы котельных агрегатов при сжигании непроектных топлив и их смесей.

В частности, наименее затратным мероприятием повышения тепловой эффективности поверхностей нагрева котла является модернизация используемых средств очистки.Для углей и их смесей с рейтингами шлакования ширм и топочных экранов, относящихся к очень высоким (ОВ), необходима модернизация средств очистки топки с установкой дальнобойных аппаратов водяной обдувки (4 аппарата типа ОВД-2).

По опыту сжигания хакасских каменных углей с высокой зольностью относительно проектного топлива может потребоваться усиление пылепроводов для защиты их от абразивного износа.

При сжигании непроектных каменных углей для снижения потерь q_4 потребуется повышение уставок по температуре аэросмеси до ~200 °С.

Таблица 4

Сравнительный анализ изменения режимных и тепловых характеристик работы котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	Температура уходящих газов при Дном	Номинальный перегрев пара при Д>0,7Дном	КПД котла при Д ном	РасходтопливаприДном	Температура газов на выходе из топки при Дном	Превышение температуры газов на выходе из топки	Температура газов перед КПП при Дном	Превышениеначала шлакования	Впрыск (пароохладитель)	Расход уходящих газов при Дном	Ограничения по котельному и вспомогательному оборудованию*
Бородинский	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	
Канский	Δ	□	Δ	∇	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	∇	
Назаровский	∇	□	Δ	∇	Δ	Δ	Δ	∇	Δ	∇	1,2
Харанорский	∇	□	Δ	∇	Δ	∇	Δ	∇	Δ	∇	1,2
Изыхский	∇	□	Δ	∇	∇	∇	∇	∇	∇	∇	1,2,4
Элегестинский	∇	□	Δ	∇	∇	∇	∇	∇	∇	∇	1,2
Берёзовский	∇	□	∇	Δ	∇	∇	∇	∇	∇	Δ	3
Черногорский	∇	□	Δ	∇	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	∇	1,2
Черногорский, отсев	Δ	□	∇	Δ	Δ	∇	Δ	∇	Δ	Δ	3
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	Δ	□	∇	∇	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	
Бородинский (70%)+ Черногорский, отсев (30%)	∇	□	Δ	∇	∇	∇	∇	∇	∇	∇	1,2,4
Бородинский(30%)+ Черногорский,отсев(70%)	∇	□	Δ	∇	∇	∇	∇	∇	∇	∇	1,2,4
Бородинский (50%)+ Черногорский, отсев (50%)	∇	□	Δ	∇	∇	∇	∇	∇	∇	∇	

= – отсутствие изменений,Δ – повышение,∇ – уменьшение показателей относительно проектного топлива.

Оценка надёжности работы пароперегревательных поверхностей нагрева котла при сжигании различных марок углей выполняется на основе определения температуры стенки металла, вычисляемой по результату теплового расчёта котла [15]. Сравнительный анализ осуществляется посредством определения относительного отклонения температуры стенки металла при сжигании непроектных углей от температуры металла, полученной при сжигании проектного топлива. В основу методики оценки температуры стенки положен нормативный метод расчёта [12], основанный на расчёте прочности металла труб по средней по толщине стенки металла температуре в наиболее теплонапряженном месте.

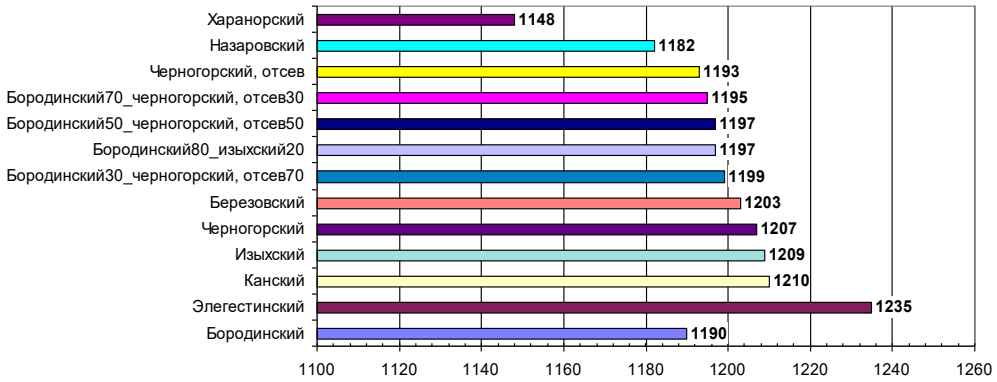
Это может быть либо место с более высокой локальной тепловой нагрузкой (например, радиационные поверхности, обращенные в топочную камеру), либо место с наиболее высокой температурой рабочей среды – пара (выходные змеевики перегревателя).

Таблица 5

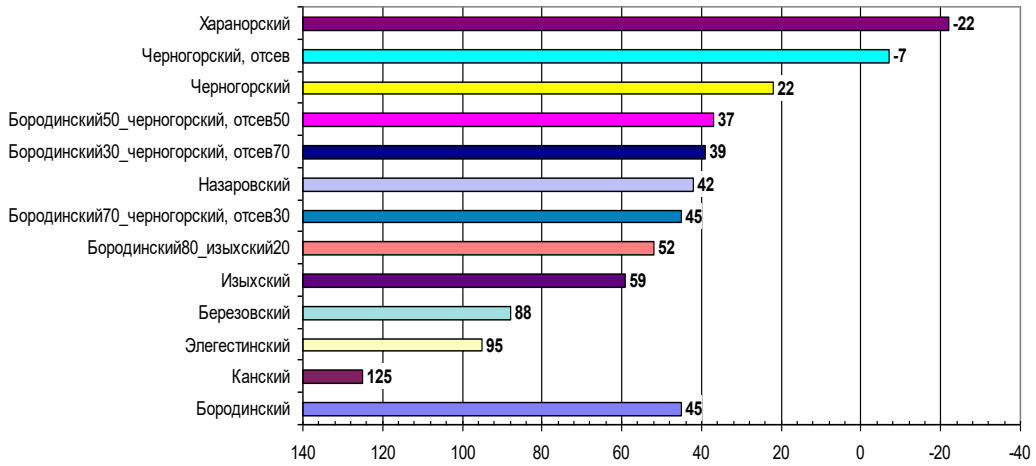
Анализ изменения численных значений режимных и тепловых характеристик работы котельного агрегата БКЗ-420-140 ТШУ

Уголь	Температура уходящих газов при Дном	Номинальный перегрев пара при Д>0,7Дном	КПД котла при Д ном	Расход топлива при Дном	Максимальное тепловое напряжение сечения топочной камеры, q_F	Температура газов на выходе из топки при Дном	Температура газов перед КПП при Дном	Температура за фестонированной частью	Ограничения по котельному и вспомогательному оборудованию
Бородинский	165	-	91,5	75,2	3,50	1190	986	920	
Канский	165	-	91,8	70,0	3,50	1210	1032	959	4
Назаровский	171	+	90,8	85,1	3,50	1182	989	930	3
Харанорский	167	+	90,9	94,3	3,50	1148	950	882	3
Элегестинский	152	-	93,1	45,4	3,50	1235	1007	932	1,4
Изыхский	152	-	93,1	52,3	3,50	1209	973	900	1,4
Берёзовский	157	-	91,4	72,5	3,50	1203	1011	949	4
Черногорский	152	-	93,0	51,8	3,50	1207	977	905	1,4
Черногорский, отсев	152	-	92,9	55,0	3,50	1193	964	893	1,4
Бородинский (80%)+ Изыхский (20%)	162	-	91,9	69,1	3,50	1197	985	917	4
Бородинский (70%)+ Черногорский, отсев (30%)	161	-	92,0	67,7	3,50	1195	980	911	4
Бородинский (30%)+ Черногорский, отсев (70%)	156	-	92,6	59,8	3,50	1199	972	900	4
Бородинский (50%)+ Черногорский, отсев (50%)	158	-	92,3	63,5	3,50	1197	976	905	4

Это может быть либо место с более высокой локальной тепловой нагрузкой (например, радиационные поверхности, обращенные в топочную камеру), либо место с наиболее высокой температурой рабочей среды – пара (выходные змеевики перегревателя).



а)



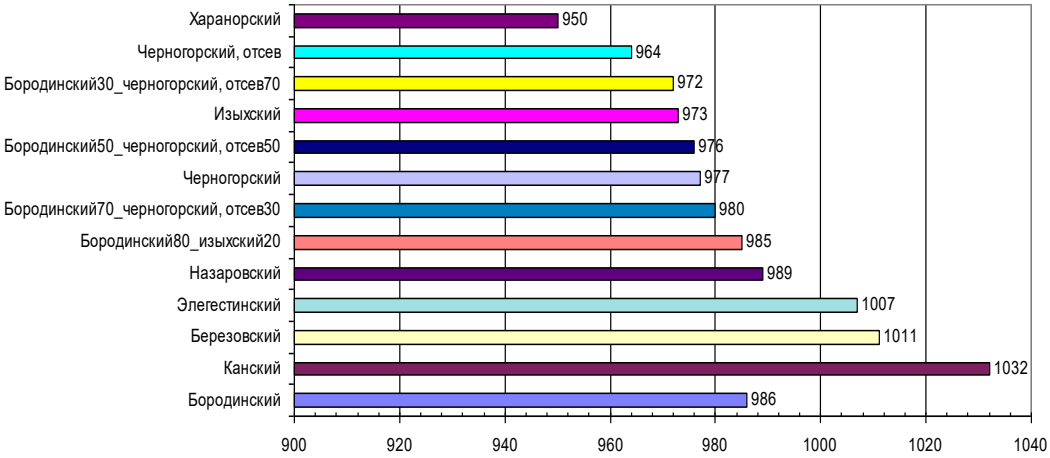
б)

Рис. 1. Температура газов на выходе из топки котла при номинальной нагрузке (*а*), превышение максимальной температуры на выходе из топки котла при номинальной нагрузке (*б*).

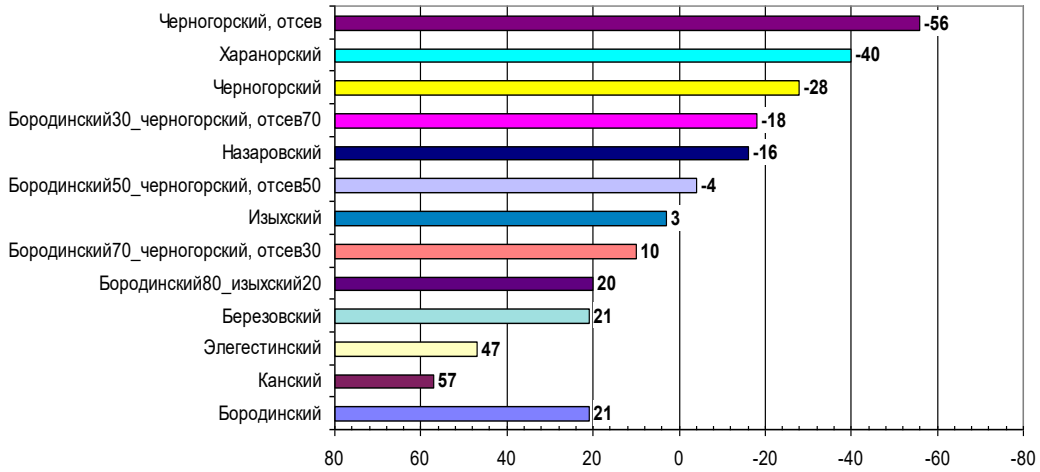
Для установления максимальной температуры металла используются данные теплового расчёта поверхности нагрева и её конструктивное исполнение. Для пароперегревательных поверхностей нагрева в зоне высоких температур газов максимальная температура стенки трубы определяется по следующей формуле [16]:

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{п}}^{\text{макс}} + \mu\beta q_{\text{макс}} \left(\frac{\delta}{\lambda_{\text{м}}} \frac{1}{1+\beta} + \frac{1}{\alpha_2} \right), \tag{2}$$

В формулу (2) входят следующие величины, требующие специального определения: $t_{\text{п}}^{\text{макс}}$ – максимальная расчётная температура пара с учётом неравномерности тепловосприятия по ширине газохода, °С; $q_{\text{макс}}$ – максимальное тепловосприятие рабочей среды в расчётном участке трубы, кВт/м^2; $\beta = d/d_{\text{вн}}$ – конструктивный коэффициент, характеризующий отношение наружного диаметра трубы к внутреннему; μ – коэффициент растечки тепла по периметру трубы в силу неравномерности её обогрева; δ – толщина стенки трубы, мм; $\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К); α_2 – локальный коэффициент теплоотдачи от стенки к рабочей среде (пару, воде), кВт/(м^2·К).



а)



б)

Рис. 2. Температура газов перед конвективным пароперегревателем котла при номинальной нагрузке (*а*), превышение температуры газов на входе КПП над Тнш котла при номинальной нагрузке (*б*)

Результаты сравнительного анализа значений температуры стенки выходного пакета пароперегревателя при сжигании непроектных углей представлены на рисунке 3. Анализ полученных данных по определению температуры стенки металла выходного пакета паропререгревателя, как наиболее нагруженного элемента тепловой схемы котельного агрегата, показал, что на котле БКЗ-420 ТШУ Абаканской ТЭЦ существенное превышение температуры металла получено только при сжигании таких непроектных углей, как канский и харанорский (на 0,2–0,3%), что как следствие может привести к изменению характеристик прочности, используемых для изготовления поверхности нагрева марок стали [17, 18].

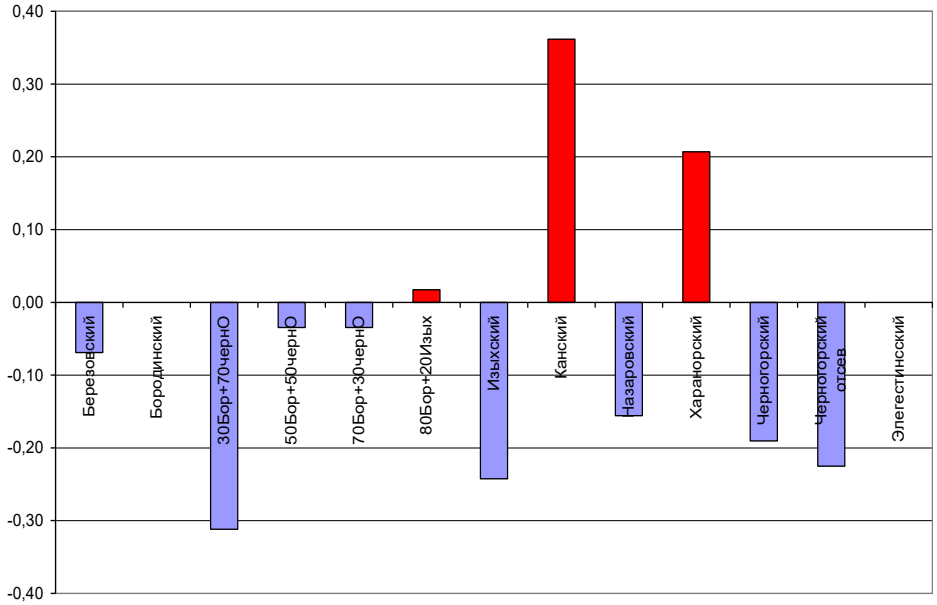


Рис. 3. Относительное изменение температуры стенки выходного пакета конвективного пароперегревателя котлоагрегата

Заключение

Экспериментально-расчетные исследования процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котельного агрегата БКЗ-420-140 Абаканской ТЭЦ при сжигании непроектных углей показали:

1. Использование коэффициентов рейтинга топлива и нормируемых параметров котельного агрегата являются необходимой и достаточно представительной информацией

для прогнозирования шлакующих и загрязняющих свойств различных углей в условиях реальных топливоиспользующих устройств;

2. Анализ шлакующих свойств рассматриваемых углей показал, что наивысшая склонность к образованию наиболее прочных железистых отложений, образующихся в основном в топочной камере котла относятся канский и назаровский угли. Из числа смесей, наибольшую склонность к образованию железистых отложений проявляет в широком диапазоне смесь бурого бородинскиого и каменного черногорского углей. С точки зрения образования натриевых отложений все рассматриваемые угли и их смеси относятся к классу нешлакующих топлив. Максимальные значения данный индекс принимает для каменных углей: изыхскогои элегестинского. Склонность к образованию кальциевых отложений, косвенно характеризующих прочность отложений, проявляется в первую очередь у бурых углей: бородинского, канского, берёзовского иназаровского месторождений.

3. Анализ результатов оценки тепловой эффективности поверхностей нагрева котельного агрегата показывает, что тепловая эффективность радиационных поверхностей нагрева котельных агрегатов снижается по мере повышения паропроизводительности котла, а конвективных наоборот повышается. Переход на сжигание смеси проектных и непроектных углей позволяет эффективно использовать непроектные топлива без ущерба тепловой эффективности поверхностей нагрева, а выбор требуемого соотношения проектных и непроектных углей позволит решить ряд технико-экономических задач энергетического использования непроектных углей.

4. По результатам теплогидравлических расчетов котельного агрегата с использованием данных экспертного анализа шлакующих и загрязняющих свойств минеральной части топлив получено, что наименее затратным мероприятием по использованию непроектных углей на котле БКЗ-420-140 ТШУ Абаканской ТЭЦ является модернизация используемых средств очистки (обдувочных аппаратов) и научно-обоснованный выбор оптимального соотношения смеси проектного и непроектного топлива по условию минимальной интенсивности процессов шлакования и загрязнения поверхностей нагрева.

Литература

1. Кожуховский И.С., Алешинский Р.Е., Говсиевич Е.Р. Проблемы и перспективы угольной генерации России. Уголь. 2016. № 2. с. 4-15.

2. Говсиевич Е.Р., Алешинский Р.Е., Векслер Ф.М., и др. Технико-экономические особенности использования непроектных углей на тепловых электростанциях. Промышленная энергетика. 2008. С. 15-20.

3. Коваль Т.В., Кудряшов А.Н. Оценка шлакующих и загрязняющих свойств углей, сжигаемых на тепловых электростанциях ПАО «Иркутскэнерго». Вестник иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. №3. С. 639-648.

4. Кузьмин В.А., Заграй И.А., Десятков И.А. Определение плавкости золы торфа месторождений Кировской области. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018;20(11-12):27-33.

5. Алехнович А.Н. Контроль и прогнозирование шлакующих свойств углей и шлакования пылеугольных котлов. Библиотечка электротехника. 2018. № 4. с. 1-72

6. Трембовля В.И., Фингер Е.Ф., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. М., Энергия, 1977.

7. Майданник М.Н., Тугов А.Н., Верещетин В.А. Оценка технического состояния котельных установок по показателям качества. Теплоэнергетик. 2020, № 4, с. 33-40.

8. Tugov A.N., Maydannik M.N. Heat-recovery steam generators at thermal power plants of Russia. Power Technology and Engineering. 2019. T.52, №5, p. 555-558.

9. Алехнович А.Н., Артемьева Н.В. Влияние зольности на шлакующие свойства углей и шлакование пылеугольных котлов. Электрические станции. 2017. № 3. с. 8-15.

10. Алехнович А.Н. Экспертная оценка и прогнозирование шлакующих свойств углей. Электрические станции. 2015. №8. С. 7-17

11. Бойко Е.А., Жадовец Е.М., Янов С.Р. Анализ тепловой эффективности полурадиационных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов. Электрические станции.2010. №10.с. 41-46

12. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание 3-е, перераб.и дополненное. СПб: НПО ЦКТИ. 1998. 256 с.

13. Тугов А.Н., Рябов Г.А., Штегман А.В., Рыжий И.А., Литун Д.С. Опыт ВТИ по использованию в энергетике проблемных топлив. Теплоэнергетика. 2016, № 7, с. 3-11.

14. Zhang Y., Li Q., Zhou H. Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces. Elsevier. 2016. 350 p.

15. Tong H., Zhang X., Tong Z., et al. Online Ash Fouling Prediction for Boiler Heating Surfaces based on Wavelet Analysis and Support Vector Regression. Energies. 2020. V.13(1).№ 59. p. 64-75.

16. ZhangS., ShenG., AnL., LiG. Ashfouling monitoring based on acoustic pyrometry in boiler furnaces. Appl. Therm. Eng. 2016. 84. p. 74–81

17. Trojan M., Taler D. Thermal simulation of super heaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. Fuel. 2015. V.150. pp. 75–87

18. Menn N., Chudnovskiy B. New technology for monitoring fouling deposition in coal fired boilers. VGB Powertech., 2016. №6. p. 65-70.

Авторы публикации

Бойко Евгений Анатольевич – д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Сибирского федерального университета (СФУ).

Загородний Игорь Владимирович – аспирант, ведущий инженер ОППР АО «Красноярская ТЭЦ-1».

References

1. Kozhukhovskii IS, Aleshinskii RE, Govsievich E. R. *Problemy i perspektivy ugol'noi generatsii Rossii*. Ugol'. 2016;2:4-15.

2. Govsievich ER, Aleshinskii RE, Veksler FM. Brzhezyanskaya N.V. Tekhniko-ekonomicheskie osobennosti ispol'zovaniya neproektnykh uglei na teplovykh elektrostantsiyakh. *Promyshlennaya energetika*, 2008, s. 15-20.

3. Koval' TV, Kudryashov AN. Otsenka shlakuyushchikh i zagryaznyayushchikh svoistv uglei, szhigaemykh na teplovykh elektrostantsiyakh PAO «Irkutskenergo». *Vestnik irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2020;24(3):639-648.

4. Kuzmin VA, Zagrai IA, Desiatkov IA. Determination of peat ash fusibility of Kirov region deposits. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(11-12):27-33.

5. Alekhnovich A.N. Kontrol' i prognozirovanie shlakuyushchikh svoistv uglei i shlakovaniya pyleugol'nykh kotlov. *Bibliotechka elektrotekhnika*. 2018;4:1-72.

6. Trembovlya VI, Finger EF, Avdeeva AA. *Teplotekhnicheskie i spytaniya kotel'nykh ustanovok*. M., Energiya, 1977.

7. Maidannik MN, Tugov AN, Vereshchetin VA. Otsenka tekhnicheskogo sostoyaniya kotel'nykh ustanovok po pokazatelyam kachestva. *Teploenergetik.* 2020;4:33-40.

8. Tugov AN, Maydannik MN. Heat-recovery steam generators at thermal power plants of Russia. *Power Technology and Engineering*. 2019;52(5):555-558.

9. Alekhnovich AN, Artem'eva NV. Vliyanie zol'nosti na shlakuyushchie svoistva uglei i shlakovanie pyleugol'nykh kotlov. *Elektricheskie stantsii.* 2017;3:8-15.

10. Alekhnovich AN. Ekspertnaya otsenka i prognozirovanie shlakuyushchikh svoistv uglei. *Elektricheskie stantsii*. 2015;8:7-17.

11. Boiko EA, Zhadovets EM, Yanov SR. Analiz teplovoi effektivnosti poluradiatsionnykh i konvektivnykh poverkhnostei nagreva pyleugol'nykh parovykh kotlov. *Elektricheskie stantsii*.2010;10:41-46

12. Teplovoi raschet kotlov (normativnyi metod). Izdanie 3-e, pererab.i dopolnennoe. SPb: NPO TsKTI. 1998. 256 s.

13. Tugov AN, Ryabov GA, Shtegman AV, et al. Opyt VTI po ispol'zovaniyu v energetike problemnykh topliv. *Teploenergetika.* 2016;7:3-11.

14. Zhang Y, Li Q, Zhou H.Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces. *Elsevier.* 2016. 350 p.

15. Tong H, Zhang X, Tong Z, et al. Online Ash Fouling Prediction for Boiler Heating Surfaces based on Wavelet Analysis and Support Vector Regression. *Energies.* 2020,13(1):59:64-75.

16. Zhang S, Shen G, An L., et al. Ash fouling monitoring based on acoustic pyrometry in boiler furnaces. *Appl. Therm. Eng*. 2016;84:74-81

17. Trojan M, Taler D. Thermal simulation of superheaters taking into account the processes occurring on the side of the steam and flue gas. Fuel. 2015;150:75–87

18. Menn N, Chudnovskiy B. New technology for monitoring fouling deposition in coal fired boilers. *VGB Powertech.*, 2016,6:65-70.

Authors of the publication

Evgenii A. Boiko – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Igor V. Zagorodnii – Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.

Получено ***18 ноября 2020г.***

Отредактировано ***9 декабря 2020г.***

Принято ***11 декабря 2020г.***