

Assessment of the Slagging Tendency in Power Plant Boiler Furnaces Depending on the Physical-Chemical Characteristics of Ash and Coal

Chernov S.L., Prokhorov V.B., Pay A.V., Aparov V.D.

National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, Russian Federation

Abstract. The purpose of the work is to select replacing design coal possible options for low slagging potential reasons in the furnace and on adjacent heating surfaces. Solved problems: the main slagging indices (SI) are summarized, based on considering the two main parameters of the formation of ash deposits, namely viscosity and fusibility. An analysis of existing methods for assessing slagging processes of heating surfaces in steam power boilers was carried out. The scientific goal is achieved by the proposed method of ranking coals according to their slagging tendency on power boiler heating surfaces based on their physicochemical properties. The methodology is based on the slagging potential dependence of the fusibility and viscosity ash characteristics, considering the ratio of the ash percentage content to the heating value of coal. The most important result is ranking of 28 coals of various grades (subbituminous, bituminous, anthracite) burned at Russian power plants according to their tendency to form ash deposits on the furnaces of power boilers. The significance of the results obtained lies in the identification of two coal deposits, subbituminous Irsha-Borodinsky and Berezovsky in Eastern Siberia and Kuznetsky bituminous in Western Siberia, which are universal during the transition to burning non-design fuel from the slagging potential point of view. The dependences of the change in ash viscosity and SI on the SiO_2 / Al_2O_3 and Fe_2O_3 / SiO_2 ratios in ash for Irsha-Borodinsky and Moscow region coals were under consideration. It was concluded that the value of the SI is directly proportional to the load ash content A' and could differ more by an order of magnitude for different coals.

Keywords: power plant, power boilers, solid fuel, coal, slagging, ash fusibility, ash viscosity.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.4-60.06>

UDC: 662.959

Evaluarea susceptibilității la zgură a cuptoarelor cazanelor energetice în funcție de caracteristicile fizico-chimice ale cenușii și cărbunelui

Cernov S.L., Prohorov V.B., Pay A.V., Aparov V.D.

Universitatea Națională de Cercetare „Institutul de Inginerie Energetică din Moscova”, Moscova, Federația Rusă

Rezumat. Scopul lucrării este de a selecta opțiuni posibile pentru înlocuirea cărbunelui de proiectare din motive de probabilitate scăzută de zgură în cuptor și pe suprafețele de încălzire adiacente. Sunt rezumați principalii indici de zgură (IS), pe baza luării în considerare a celor doi parametri principali ai formării depozitelor de cenușă, și anume vâscozitatea și fuzibilitatea. A fost efectuată o analiză a metodelor existente de evaluare a proceselor de zgură a suprafețelor de încălzire în cazanele cu energie cu abur. Acest obiectiv este atins prin metoda propusă de ierarhizare a cărbunilor în funcție de tendința lor de a zgura suprafețele de încălzire a cuptoarelor cu boiler pe baza proprietăților lor fizico-chimice. Metodologia se bazează pe dependența zgurii de caracteristicile de fuzibilitate și vâscozitate ale cenușii, ținând cont de conținutul redus de cenușă al cărbunelui. Cel mai important rezultat este clasarea a 28 de cărbuni de diferite grade (maro, tari, antracit) arși la centralele rusești, în funcție de tendința acestora de a forma depozite de cenușă în cuptoarele cazanelor electrice. Semnificația rezultatelor obținute constă în identificarea a 2 zăcăminte de cărbune, ambele Berezovsky brun și Irsha-Borodinsky în Siberia de Est, și piatră Kuznetsky în Siberia de Vest, universală în trecerea la arderea combustibilului neproiectat din punctul de vedere al prevenirii zgurii. Dependența modificărilor vâscozității și IS de raportul dintre conținut și cenușă au fost obținute pentru cărbunii din bazinele Irsha-Borodinsky și regiunea Moscovei. Se arată că până la un raport de aproximativ 0.33, ambele dependențe sunt direct proporționale, iar cu o creștere suplimentară, valorile IS pentru cărbunele Irsha-Borodinsky cresc brusc.

Cuvinte-cheie: centrală electrică, centrale termice, combustibil solid, cărbune, zgură, fuzibilitate cenușii, vâscozitate cenușii.

Оценка склонности к шлакованию топок энергетических котлов в зависимости от физико-химических характеристик золы и угля

Чернов С.Л., Прохоров В.Б., Пай А.В., Апаров В.Д.

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Целью работы является выбор возможных вариантов замены проектного угля по соображениям малой вероятности шлакования в топке и на примыкающих поверхностях нагрева. Поставленная цель достигается решением следующих задач: обобщением основных индексов шлакования (IS), основанных на учете двух главных параметров образования золовых отложений, а именно вязкости и плавкости, проведения анализа существующих методик оценки процессов шлакования поверхностей нагрева в паровых энергетических котлах, предложенной методикой ранжирования углей по склонности их к шлакованию поверхностей нагрева топок энергетических котлов на основании их физико-химических свойств. В основу методики положена зависимость шлакования от плавкостных и вязкостных характеристик золы с учетом приведенной зольности угля. Наиболее существенным результатом является проведенное ранжирование 28 углей различных марок (бурые, каменные, антрацит), сжигаемых на электростанциях России, по их склонности к образованию золовых отложений в топках энергетических котлов. Значимость полученных результатов состоит в выделении 2-х месторождений углей, как бурых Березовского и Ирша-Бородинского в Восточной Сибири, так и каменного Кузнецкого в Западной Сибири, универсальных при переходе на сжигание непроектного топлива с точки зрения предотвращения шлакования. Получены зависимости изменения вязкости и IS от отношений содержания SiO_2 / Al_2O_3 и Fe_2O_3 / SiO_2 в золе для углей Ирша-Бородинского и Подмосковского бассейна. Показано, что до значения отношения Fe_2O_3 / SiO_2 , равному примерно 0.33, обе зависимости имеют прямую пропорциональную зависимость, а при дальнейшем росте значения IS для Ирша-Бородинского угля резко увеличиваются. Сделан вывод, что величина IS прямо пропорционально зависит от рабочей зольности A^r и на порядок может отличаться для разных углей.

Ключевые слова: тепловая электростанция, энергетические котлы, твердое топливо, уголь, шлакование, плавкость золы, вязкость золы.

ВВЕДЕНИЕ

Переход на альтернативное (непроектное) топливо при работе ТЭС в настоящее время возникает вследствие сокращения и необеспеченности поставок угля, ухудшения его качества, предложений по использованию более дешевого топлива, ужесточения экологических требований. Под альтернативным топливом понимается уголь, на использование которого не были рассчитаны котлы при их проектировании или реконструкции, а также ранее не прошедший промышленного или опытного сжигания на данной ТЭС.

При переводе котлов основными проблемами являются: шлакование топочных экранов и поверхностей нагрева, расположенных над топкой, загрязнение конвективных поверхностей нагрева, неустойчивость горения непроектного топлива, повышение количества вредных выбросов в атмосферу, абразивный износ конвективной части котлов, снижение экологических показателей, изменение условий работы систем пылеприготовления, шлакоудаления, золоулавливания и топливоподдачи [1].

Перед проведением опытного сжигания альтернативного топлива целесообразно проводить предварительную оценку топочного процесса с помощью численного моделирования по следующим ограничивающим параметрам: допустимый механический недожог твердого топлива, отсутствие шлакования топочных экранов и выходной части топки, температуры газов на выходе из топки, образование оксидов азота. В настоящей работе рассматриваются вопросы выбора возможных вариантов замены проектного угля по соображениям малой вероятности шлакования в топке и на примыкающих поверхностях нагрева ширмах, фестонах и т.д.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

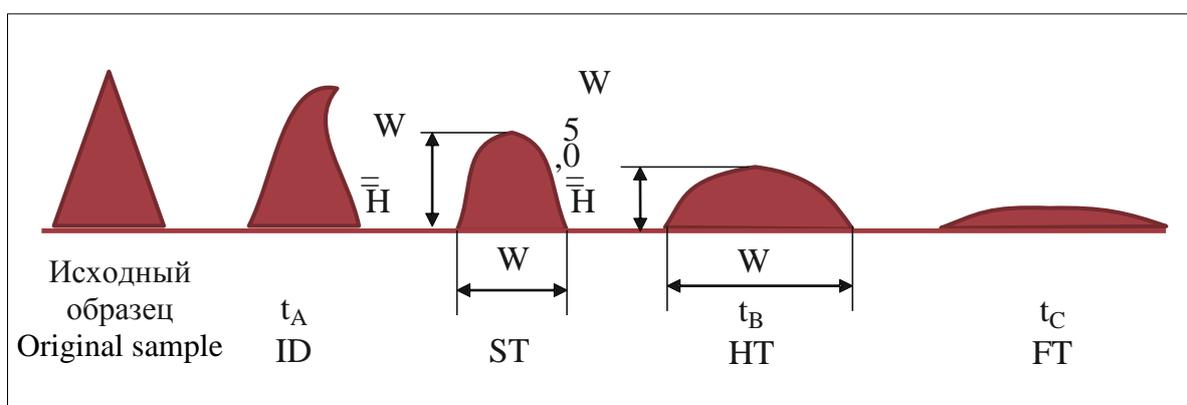
Основными характеристиками золы, определяющими процесс шлакования топки и загрязнения газоходов котла, являются ее плавкость и вязкость, которые зависят от химического состава [2].

В течение десятилетий способность золы к шлакованию определялась по результатам теста на плавкость по изменению формы пирамиды из частичек золы при его

постепенном нагревании рис. 1. По ГОСТ 2057-94 различают температуры начала деформации, начала размягчения t_B (t_2), начала истинного жидкого состояния t_B (t_2). По американской методике ASTM 1857 различают следующие характерные температуры: ID – температура начала деформации, ST – температура размягчения или плавления, HT – температура полусферы, FT – температура жидкоплавкого состояния. Основное различие двух методик заключается в том, что температура начала размягчения t_B не соответствует температуре размягчения ST, а соответствует температуре полусферы HT. Тест на плавкость, определяющий

температурные границы фаз (размягчение, плавление, жидкое состояние) носит скорее описательный, чем измерительный характер. То есть тест не может предсказать реальную ситуацию, которая возникает при эксплуатации котла [3].

Следует отметить, что существует более новый ГОСТ Р 54238–2010 близкий по терминам и определениям к ASTM 1857, однако в справочной литературе сохранились плавкостные характеристики, полученные по старой методике.



ID – onset of deformation, ST – temperature of softening or melting of the sphere, HT – temperature of the hemisphere, FT – temperature of the liquid-melting state (according to ASTM 1857)

Figure 1. The location scheme of direct-flow burners and nozzle. Change in sample shape when determining fusibility and accepted characteristic temperatures (t_A, t_B, t_C according to GOST 2057-94).

ID – начало деформации, ST – температура размягчения или плавления сферы, HT – температура полусферы, FT – температура жидкоплавкого состояния (по ASTM 1857)

Рис. 1. Изменение формы образца при определении плавкости и принятые характерные температуры (t_A, t_B, t_C по ГОСТ 2057-94).

Особую роль в определении склонности угля к шлакованию, то есть прилипанию частичек золы на поверхность топки и образованию прочных отложений, играет вязкость частичек золы, которая во всех случаях увеличивается с уменьшением температуры [4]. В работе [5] показано, что для золы с весовым содержанием оксида железа более 5.0 % температура прилипания к стенкам равна около 1177 °C, в то время как для остальной золы прослеживается обратно пропорциональная зависимость прилипания от её вязкости. Основная зависимость склонности к шлакованию от химического состава золы угля заключается в том, что с

ростом содержания SiO_2 (свыше 75% db) и уменьшением процентного содержания Fe_2O_3 (менее 5 % db) угли становятся «хорошими» и их зола не вызывает загрязнения поверхностей нагрева [2,3]. Получила распространение методика оценки склонности угля к шлакованию по отношению суммы содержания щелочных оксидов В ($Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O$), к кислотным оксидам А ($SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2$). Повышение отношения В/А снижает температуру плавкости золы, тем самым повышая склонность золы к шлакованию. Отношение В/А меньше 0.11 считается хорошим с точки зрения отсутствия шлакования в топке. В

работе [2] предлагается эмпирический индекс сернистости (RS), который представлен в виде произведения содержания серы S db на отношение В/А. Метод получен при оценке склонности к шлакованию на углях США и Европы, в которых железо представлено в виде сульфата железа (FeS_2) или пирита. Уголь имеет малую склонность к шлакованию при $RS < 0.6$. Однако данный индекс не годится для углей с малым содержанием серы, где преобладает соединение железа с углеродом ($FeCO_3$) в виде сидерита и основным фактором является содержание в золе Fe_2O_3 . В этом случае содержание железа рассматривается вместо содержания серы и индекс RS не применим.

В таблице 1 [6, 21-24] обобщены основные индексы шлакования, основанные на учете двух главных параметров образования золовых отложений, а именно вязкости и

плавкости. В свою очередь последние в прямую зависят от её химического состава [7]. Отдельно рассматривается влияние химического состава угольных смесей на вязкость и плавкость золы [8,9]. Объясняется это тем, что горение смеси углей протекает не как сжигание топлива с усредненными характеристиками, а как горение двух различных по теплотехническим параметрам углей. Исследование влияния свойств золы на ее количественные характеристики проводились в [10]. В настоящей работе не рассматривается процесс осаждения и образования отложений золы в зависимости от динамических характеристик двухфазного потока, которые были исследованы во многих работах, в частности в [11-13, 25-26]. Также не рассматривается влияние минералогического состава образований на усадку и вязкостные характеристики золы, которые исследуются, например, в [14].

Таблица 1.

Применяемые индексы шлакования

Table 1.

Applied slagging indices

№ п/п	Наименование Name	Индекс шлакования Slagging index	Потенциал шлакования Slagging potential		
			Низкий Low	Средний Medium	Высокий High
1	Кремневое отношение Silica ratio	$SA = 100 \cdot \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$	72-80	65-72	50-65
2	Щелочно-кислотное отношение В/А ratio	$B / A = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	< 0.11	0.11 – 0.14	> 0.14
3	Плавкость золы, °C Ash fusibility	$AF = \frac{4 \cdot t_A - t_C}{5}$	> 1343	1232 - 1343	< 1232
4	Содержание железа, % Iron content	$RF = Fe_2O_3$	< 6	6 - 7	> 7
5	Температура шлакования (ВТИ), °C Slagging temperature	$t_{shl} = 945 + 7.77 \cdot \frac{A}{B}$	< 1050		

Вязкостно-температурная зависимость изучалась в России в работах [15,16] в основном применительно к топкам с жидким шлакоудалением, а также для прогнозирования некоторых аспектов шлакования. Получили распространение эмпирические методы, в которых наряду с моделями вязкого течения применяются эмпирические коэффициенты. Наиболее широко используется упрощенное описание зависимости вязкости от температуры в виде уравнений на базе зависимостей Аррениуса

$$\mu = A \cdot \exp\left(1000 \frac{B}{T}\right) \text{ или Веймана-Френкеля}$$

$$\mu = AT \cdot \exp\left(1000 \frac{B}{T}\right), \text{ где } A \text{ и } B \text{ эмпирические}$$

коэффициенты часто с физическим смыслом, T – температура. Далее в качестве основной расчетной модели нами выбирается уравнение Аррениуса, так как оно достаточно точно описывает зависимость вязкости от температуры для реальных шлаков, в то время как уравнение Веймана-Френкеля дает в интересующем интервале температур приблизительно тот же результат при значительно более сложной схеме расчетов [15].

II. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ

Для эффективного моделирования процессов шлакования в ряде публикаций [3,7,17] предлагаются следующие основные допущения:

- пиковые значения графика усадки достигаются при температурах между 1100–1500 °С и в эту область попадают температуры размягчения большинства исследуемых углей;

- усадка золы рассматривается как определяющий критерий липкости и может быть заменен вязкостью золы;

- для липкой частицы характерной температурой при столкновении с поверхностью является температура размягчения, $ST(t_B)$, при которой частица прилипает и способна содействовать образованию отложений;

- интенсивность шлакования поверхностей котла прямо пропорционально доле золы в общей массе угля, однако склонность к шлакованию обратно пропорционально вязкости золы.

Эмпирический расчетный метод на базе уравнения Аррениуса разработан в BCURA (British Coal Utilisation Research Association),

носит название методики Watt & Fereday и впервые приведен в [18]. Позднее в работе [6] был проведен сравнительный анализ различных методик оценки склонности золы 4-х индийских, 4-х австралийских, индонезийского, колумбийского, южноафриканского, 2-х американских и 3-х британских углей к шлакованию на основе расчетных индексов, который показал наилучшую сходимость результатов именно для вышеназванного метода. Зависимость вязкость -температура приводится не в виде экспоненциальной, как было показано выше, а в виде логарифмической зависимости:

$$\ln(\mu) = C + 10^7 \cdot m / (t - 150)^2 \quad (1)$$

где t - равна температуре размягчения ST , m и C - эмпирические коэффициенты, отражающие влияние на вязкость каждого из пяти элементов: $SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO$. Сумма долей пяти элементов должна быть равна 100%. Эмпирические коэффициенты рассчитываются по нижеследующим формулам (2) и (3), взятым из [19]:

$$m = 0.01404294(SiO_2) + 0.0100297(Al_2O_3) - 0.296285 \quad (2)$$

$$C = 0.015418(SiO_2) - 0.0388047(Al_2O_3) - 0.0167264(Fe_2O_3) - 0.0089096(CaO) - 0.012932(MgO) + 0.0467 \quad (3)$$

Интересно отметить, что коэффициенты в формулах (2) и (3) из [19] уточнены на основе обширной базы данных и отличаются от первоначально полученных в [18]. Проведенный Уральской теплотехнической лабораторией (УТЛ) на собственной базе данных расчетный анализ [15,16] также отличается от первоначального. При модификации коэффициентов, определенных в [18], предложены новые эмпирические коэффициенты расчетных формул применительно к российскому банку данных. Вместо (1) УТЛ была предложена модифицированная формула, отличающаяся тем, что коэффициент m умножался на 1.5, а из коэффициента C вычитается 1.25. При этом коэффициенты становятся ближе к рассчитанным в [19], особенно m , где расхождение составляет всего 10–15 %. Что касается C , то в [19] при ее расчете

учитывается поправка Vomkamp на содержание MgO в золе, которая не берется в расчет при первоначальной и модифицированной версиях УТЛ метода Watt-Feraday.

В качестве t °C в (1) принимается температура размягчения золы ST, при которой частички золы оплавляются и имеют тенденцию прилипнуть к стенкам. Расчет ST ведется по химическому составу золы с использованием следующей эмпирической формулы [20]:

$$ST = a(SiO_2) + b(Al_2O_3) + c(Al_2O_3) + d(CaO) + e(MgO) + f(\infty) + g \quad (4)$$

где

$$\infty = 100 - (SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + CaO + MgO) \quad (5)$$

Величины констант a, b, c, d, e, f, приведены в табл. 2 в зависимости от процентного содержания SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 в золе.

Таблица 2.

Величины констант при расчете логарифма вязкости по модели Ватта-Фарадея

Table 2.

Values of constants when calculating the logarithm of viscosity using the Watt-Faraday model

№ п/п № п/о	Содержание в золе Ash content	a	b	c	d	e	f	g
1	$SiO_2 \leq 60\%, Al_2O_3 > 30\%$	69.94	71.01	65.23	12.16	68.31	67.19	-5486
2	$SiO_2 \leq 60\%, Al_2O_3 \leq 30\%, Fe_2O_3 \leq 15\%$	92.55	97.83	84.52	83.67	81.04	91.92	-7891
3	$SiO_2 \leq 60\%, Al_2O_3 \leq 30\%, Fe_2O_3 > 15\%$	-3.01	5.08	-8.02	-9.67	-5.86	-3.99	1531
4	$SiO_2 > 60\%$	10.75	13.03	-5.28	-5.88	-10.28	3.75	453

В отличие от методики, изложенной в [6] расходные характеристики золы нами представляются в виде широко применяемого в России параметра приведенной зольности $A^{pr} = \frac{A^r}{Q_n^r} \cdot \left(\frac{\%kg}{MJ}\right)$, где A^r – доля содержания золы на рабочую массу угля, %, Q_n^r – низшая теплота сгорания угля, МДж/кг. В английской работе применяются зольность на сухую массу и высшая теплота сгорания топлива, что с нашей точки зрения не совсем отражает реальный выход золы при сжигании угля в топке энергетического котла. Окончательно считаем, что индекс шлакования (IS)

пропорционален A^{pr} и обратно пропорционален вязкости золы, выраженной в виде $\ln(\mu)$:

$$IS = \frac{A^{pr}}{\ln(\mu)} \quad (6)$$

III. ПАРАМЕТРЫ ИССЛЕДУЕМЫХ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ УГЛЕЙ

По вышеприведенной методике в настоящем исследовании были проведены расчеты для 28 углей, используемых в России. Характеристика углей и золы приведена в табл.3 - 4, в которой угли расположены по географическому принципу и включает все

основные марки углей: антрацит, каменный уголь, бурый уголь. W^r, A^r, C^r обозначают соответственно содержание влаги, минеральных примесей и углерода на рабочую массу угля. $VГ$ – содержание летучих веществ на горючую массу топлива. $SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO$ – элементное содержание в золе, приведенное на бессульфатную массу. Среди месторождений углей по географическому принципу приведены характеристики двух европейских (Уголь 1-2), шести углей залегающих в районе Уральских гор (уголь 3 - 8), двух казахстанских (Уголь 9-10), шести западносибирских (Уголь 11-16), семи восточносибирских (Уголь 17-23), четырех дальневосточных (Уголь 24-27), одного киргизского (Уголь 28). Европейские угли представлены антрацитом и бурым углями; Казахстан и Западная Сибирь – каменными; Урал и Дальний Восток – как каменными, так и бурыми углями; Восточная Сибирь и Киргизия – бурыми.

Антрацит имеет малую влажность, высокое содержание углерода. В данном конкретном случае отмечается повышенная зольность и сравнительно малая теплота сгорания. Данный факт объясняется тем, что в энергетику направляется не сам антрацит, а отходы от продуктов его переработки. Каменные угли представлены широкой областью расхождения всех вышеназванных параметров. Бурые угли характеризуются высокими значениями влажности и выхода летучих, изменяющейся в широком диапазоне зольностью, малыми содержанием углерода и теплотой сгорания.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИНДЕКСА ШЛАКОВАНИЯ

Результаты расчетов приведены в табл. 5, в которой угли представлены по убыванию значений IS. В первой и второй колонках показаны соответственно номера углей по порядку текущей таблицы и номера строк по табл. 3. ST представляет собой температуру размягчения золы, °C, рассчитанную по формуле (4); $\ln(\mu)$ – натуральный логарифм вязкости золы, Па·с, рассчитанный по (1); A^{pr} – приведенная зольность, $(\frac{\%kg}{MJ})$, IS – безразмерный индекс шлакования. Номер угля по порядку показывает его склонность к шлакованию: чем он больше, тем выше

склонность угля к шлакованию. Первые десять углей имеют высокую ST от 1258 до 1475 °C, большую вязкость $\ln(\mu)$ от 5.854 до 4.753 Па·с и высокую приведенную зольность от 1.707 до 3.529 $(\frac{\%kg}{MJ})$.

Решающее значение для этих углей имеет большая величина приведенной зольности, то есть концентрация золы в потоке дымовых газов. Дальнейшее снижение IS происходит при изменении температуры размягчения и вязкости в широких пределах, в то время как приведенная зольность имеет общую тенденцию к уменьшению. Однако, например, уголь Кызыл-Кия (пп. 11) стоит достаточно высоко в таблице несмотря на малую зольность из-за значительного снижения вязкости золы. Сравнение углей одной марки, но разных месторождений не выявили каких-нибудь зависимостей с точки зрения склонности к шлакованию: как бурые, так и каменные угли присутствуют как сверху, так и внизу таблицы. 6 верхних углей с наибольшей предрасположенностью к шлакованию включают 3 бурых, 2 каменных углей и антрацит. Можно предположить, что содержание летучих и связанное с ним содержание углерода в угле мало влияют на склонность к шлакованию.

Предложенная методика оценки склонности углей к шлакованию не способна оценить скорость возникновения загрязнений на теплообменных поверхностях топки котла, которая зависит, кроме состава, количества золы и свойств угля, от температурного режима и аэродинамики топки. Учитывая эти условия, можно создать безшлаковочный режим в топке даже для самых склонных к шлакованию углей. Однако IS позволяет ранжировать угли по их склонности к образовывать отложения. Это особенно важно при предварительном выборе непроектного топлива взамен сжигавшегося ранее. С помощью табл. 5, зная IS обоих углей можно определить какой из них более склонен к образованию отложений. Если непроектный уголь имеет меньше IS, то его применение не должно привести к дополнительным проблемам. В противном случае можно поискать другое непроектное топливо. Такой подход упростит предварительный выбор непроектного топлива и может применяться для любых твердых топлив, в том числе не вошедших в табл. 5.

В табл. 5 каменные угли Кузнецкого бассейна с порядковыми номерами 22, 23, 25, 26 имеют малую величину IS и, следовательно, не обладают склонностью к шлакованию. Все они относятся к одному бассейну, запасы высококачественного угля

которые одни из самых больших в России и, следовательно, использование их как непроектных очень перспективно.

Таблица 3.

Элементарный состав исследуемых углей

Table 3.

Elementary composition of the studied coals

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$W^r, \%$	$A^r, \%$	$C^r, \%$	$V^{daf}, \%$	$Q_n^r, \frac{MJ}{kg}$
1	Донецкий Donetskiy	A A	8.5	34.8	52.2	4	18.23
2	Подмосковный Podmoskovniy	2Б 2В	32.1	30.6	24.3	48	8.67
3	Челябинский Cheliabinskiy	3Б 3В	17	35.7	33.6	44	12.56
4	Интинское Intinskiy	Д D	11.5	28.8	44.2	40	16.87
5	Воркутинское Vorkutinskiy	Ж J	8	29.4	52.6	33	20.77
6	Кизилловский Kizilovski	Ж J	6	32	48.6	43	19.68
7	Бабаевское Babaevski	1Б 1В	56	10.1	23.2	65	8.1
8	Тулганское Tulganski	1Б 1В	52	14.4	22.2	65.5	7.45
9	Экибастузский 1-я гр. Ekibastuzski 1 group	СС SS	6.5	36.9	44.8	25	17.38
10	Экибастузский 2-я гр. Ekibastuzski 2 group	СС SS	5	45.6	38.4	25	14.61
11	Кузнецкий Kuznetski	Д D	11.5	15.9	56.4	40.5	21.9
12	Кузнецкий Kuznetski	Г G	13	28.7	46.6	41.5	18.09
13	Kuznetski Кузнецкий	Т T	7	14.6	70.2	12.5	25.12
14	Кузнецкий Kuznetski	1СС 1SS	9	18.2	60.8	31	23.4
15	Кузнецкий Kuznetski	2СС 2SS	8.5	16.5	66	20	25.33
16	Кузнецкий Kuznetski	Ж J	6	39.5	45.2	37	17.71
17	Ирша-Бородинское Irsha-Borodinski	2Б 2В	33	7.4	42.6	47	15.28
18	Назаровское Nazarovski	2Б 2В	39	7.9	37.2	47	12.85
19	Березовское Berezovski	2Б 2В	33	4.7	44.2	48	15.66
20	Гусиноозерское Gusinoozerski	3Б 3В	26	18.5	39.4	43	14.32

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$W^r, \%$	$A^r, \%$	$C^r, \%$	$V^{daf}, \%$	$Q_n^r, \frac{MJ}{kg}$
21	Итатское Itatskiy	1Б 1В	40.5	6.8	36.6	48	12.81
22	Харанорское Naranorskiy	1Б 1В	40	13.2	33.5	44	11.39
23	Азейское Azeiyskiy	3Б 3В	25	16.5	42.7	48	15.99
24	Нерюнгринское Nurengrinskiy	3СС 3СС	10	19.8	60	20	22.48
25	Артемовское Artemovskiy	3Б 3В	23	33.1	29.4	50	11.14
26	Райчихинское Raichihinskiy	2Б 2В	37	13.9	34.9	43	11.72
27	Южный Сахалин South Sakhalin	Г G	10.5	19.7	56.5	42	22.23
28	Кызыл-Кия Kizil-Kiya	3Б 3В	28	13	45.4	35	16.16

Таблица 4.

Состав золы исследуемых углей

Table 4.

Composition of the ash of the coals under study

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$SiO_2, \%$	$Al_2O_3, \%$	$Fe_2O_3, \%$	$CaO, \%$	$MgO_2, \%$
1	Донецкий Donetskiy	А А	54.39	23.70	16.19	4.02	1.69
2	Подмосковный Podmoskovniy	2Б 2В	49.08	36.25	9.78	4.18	0.71
3	Челябинский Cheliabinskiy	3Б 3В	58.70	26.21	9.01	3.14	2.94
4	Интинское Intinskiy	Д D	56.58	19.27	14.61	7.15	2.38
5	Воркутинское Vorkutinskiy	Ж J	65.28	20.23	8.97	3.13	2.40
6	Кизилловский Kizilovski	Ж J	56.54	23.07	15.24	3.81	1.34
7	Бабаевское Babaevskiy	1Б 1В	56.00	24.84	2.69	14.39	2.07
8	Тулганское Tulganskiy	1Б 1В	57.57	24.61	5.46	7.11	5.25
9	Экибастузский 1-я гр. Ekibastuzskiy 1 group	СС SS	63.98	28.88	5.20	1.12	0.82
10	Экибастузский 2-я гр. Ekibastuzskiy 2 group	СС SS	60.80	30.50	6.24	1.74	0.72
11	Кузнецкий Kuznetskiy	Д D	63.76	21.89	7.23	4.25	2.87
12	Кузнецкий Kuznetskiy	Г G	62.65	21.56	6.72	6.19	2.88
13	Кузнецкий Kuznetskiy	Т T	58.33	26.77	7.71	5.00	2.19

Уголь Coal	Бассейн, месторождение Field name	Марка Type	$SiO_2, \%$	$Al_2O_3, \%$	$Fe_2O_3, \%$	$CaO, \%$	$MgO_2, \%$
14	Кузнецкий Kuznetskiy	1CC 1SS	58.44	24.69	10.63	4.27	1.98
15	Кузнецкий Kuznetskiy	2CC 2SS	62.68	23.58	9.01	2.94	1.78
16	Кузнецкий Kuznetskiy	Ж J	67.87	20.53	5.32	4.15	2.13
17	Ирша-Бородинское Irsha-Borodinskiy	2Б 2B	47.56	13.11	8.03	26.22	5.08
18	Назаровское Nazarovski	2Б 2B	30.96	10.15	19.29	35.53	4.06
19	Березовское Berezovski	2Б 2B	30.61	11.22	9.18	42.86	6.12
20	Гусиноозерское Gusinoozerskiy	3Б 3B	53.51	24.61	12.77	5.97	2.93
21	Итатское Itatskiy	1Б 1B	35.73	13.16	14.17	33.40	3.54
22	Харанорское Haranorskiy	1Б 1B	59.86	24.05	5.68	7.64	2.79
23	Азейское Azeiyskiy	3Б 3B	53.24	29.05	7.39	8.10	2.23
24	Нерюнгринское Nurengrinskiy	3CC 3SS	55.41	28.53	8.34	5.15	2.57
25	Артемовское Artemovski	3Б 3B	64.26	27.36	4.77	1.80	1.80
26	Райчихинское Raichihinskiy	2Б 2B	57.08	26.18	8.01	7.29	1.44
27	Южный Сахалин South Sakhalin	Г G	54.60	27.71	8.79	6.62	2.28
28	Кызыл-Кия Kizil-Kiya	3Б 3B	31.88	21.29	21.50	20.98	4.36

Таблица 5.

Результаты расчета индекса шлакования (IS) (Представлены в убывающем порядке по величине IS)

Table 5.

Results of calculating the slagging index (SI) (Presented in descending order by SI value)

№ п.п. In order	№ табл. 3-4 table	Уголь Coal	Марка Type	ST	$\ln(\mu), Pa \cdot s$	$A^{pr}, (\frac{\%kg}{MJ})$	IS
1	2	Подмосковный бассейн Podmoskovniy	2Б 2B	1259	5.342	3.529	0.6606
2	10	Экибастузский 2-я гр. Ekibastuzskiy 2 group	CC SS	1453	4.753	3.121	0.6566
3	25	Артемовское Artemovski	3Б 3B	1446	5.099	2.971	0.5827
4	3	Челябинский Cheliabinskiy	3Б 3B	1368	5.047	2.842	0.5632

PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 4 (60) 2023

№ п.п. In order	№ табл. 3-4 table	Уголь Coal	Марка Type	ST	$\ln(\mu), Pa \cdot s$	$A^{pr}, (\frac{\%kg}{MJ})$	IS
5	9	Экибастузский 1-я гр. Ekibastuzskiy 1 group	СС SS	1475	4.888	2.123	0.4344
6	1	Донецкий Donetskiy	А A	1309	4.887	1.909	0.3906
7	16	Кузнецкий Kuznetskiy	Ж J	1376	5.854	2.230	0.3790
8	8	Тулганское Tulganskiy	1Б 1B	1327	5.240	1.933	0.3689
9	6	Кизилловский Kizilovskiy	Ж J	1311	5.125	1.626	0.3173
10	4	Интинское Intinskiy	Д D	1258	5.470	1.707	0.3121
11	28	Кызыл-Кия Kizil-Kiya	3Б 3B	1142	2.815	0.804	0.2858
12	12	Кузнецкий Kuznetskiy	Г G	1306	5.957	1.587	0.2663
13	20	Гусиноозерское Gusinoozerskiy	3Б 3B	1304	5.124	1.292	0.2648
14	7	Бабаевское Babaevskiy	1Б 1B	1322	5.129	1.247	0.2431
15	26	Райчихинское Raichihinskiy	2Б 2B	1357	4.968	1.186	0.2388
16	5	Воркутинское Vorkutinskiy	Ж G	1328	5.993	1.416	0.2362
17	23	Азейское Azeiyskiy	3Б 3B	1361	4.584	1.032	0.2251
18	22	Харанорское Haranorskiy	1Б 1B	1345	5.333	1.159	0.2173
19	18	Назаровское Nazarovskiy	2Б 1B	967	3.037	0.615	0.2024
20	24	Южный Сахалин South Sakhalin	Г G	1355	4.715	0.886	0.1872
21	27	Нерюнгринское Nurengrinskiy	3СС 3SS	1372	4.734	0.881	0.1868
22	14	Кузнецкий Kuznetskiy	1СС 3SS	1348	5.124	0.778	0.1518
23	11	Кузнецкий Kuznetskiy	Д D	1331	5.854	0.726	0.1240
24	21	Итатское Itatskiy	1Б 1B	982	4.377	0.531	0.1213
25	15	Кузнецкий Kuznetskiy	2СС 1SS	1351	5.587	0.651	0.1166
26	13	Кузнецкий бассейн Kuznetskiy	Т T	1374	3.863	0.581	0.1165
27	17	Ирша-Бородинское Irsha-Borodinskiy	2Б 2B	1077	5.687	0.484	0.0852
28	19	Березовское Berezovskiy	2Б 2B	898	3.863	0.3	0.0777

Угли Итатского, Ирша-Бородинского и Березовского месторождения с порядковыми номерами 24, 27, 28 относятся к бурым углям

и также имеют значительные запасы. Основные характеристики углей составляют: низшая теплота сгорания 11.8–19.0 кДж/кг;

зольность 4.4–8.0 %; сернистость 0.3–0.5 %; влажность 24–44 %. Эти угли не подлежат длительному хранению, могут самовозгораться и поэтому рекомендуются к использованию в качестве непроектного сравнительно не далеко от мест добычи.

Рассмотрим влияние зольности угля и изменения состава золы на индекс шлакования. На рис.2 приведена зависимость IS от A^r для самого шлакующего из ряда углей, приведенных в табл. 5, а именно Подмосковского бассейна. Отметим, что

данный уголь является бурым и в этом случае можно применить широко известную зависимость, что при увеличении зольности этой марки углей пропорционально уменьшается влажность и наоборот. Данную зависимость можно проследить на примере характеристик углей в табл. 3. Анализ полученной зависимости показывает, что величина IS прямо пропорционально зависит от A^r и с ростом последней увеличивается и потенциал шлакования поверхностей нагрева.

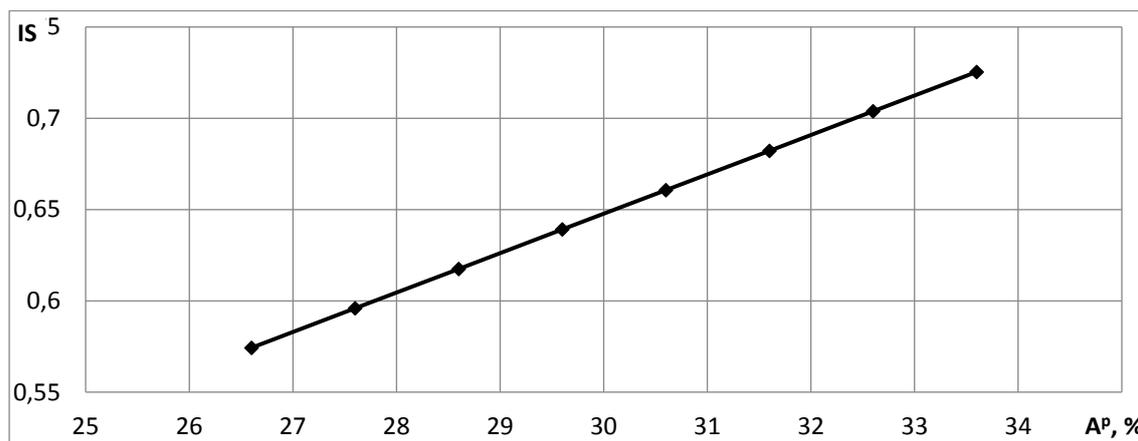
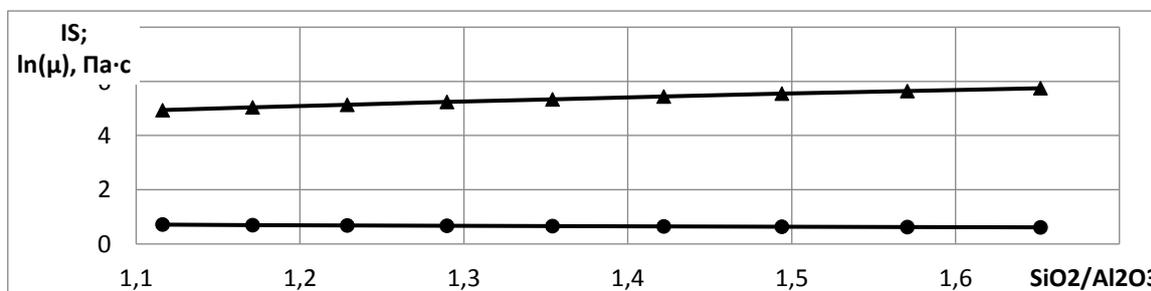


Figure 2. The value of the slagging index for Moscow region coal depending on changes in working ash content.

Рис. 2. Величина индекса шлакования для Подмосковского угля в зависимости от изменения рабочей зольности.

На рис. 3,4 приведены зависимости изменения вязкости золы и IS от соотношения SiO_2 / Al_2O_3 в золе соответственно для самого шлакующего угля Подмосковского бассейна и одного из самых благоприятных с этой точки зрения Ирша-Бородинского угля. Для обоих углей характерна плавная восходящая зависимость для вязкости и плавная

нисходящая для IS с ростом соотношения SiO_2 / Al_2O_3 . Однако, IS для угля Подмосковского бассейна примерно на порядок больше, чем для Ирша-Бородинского, а вязкость при этом примерно одинакова. Объясняется этот факт существенно большей A^{pr} в первом случае.



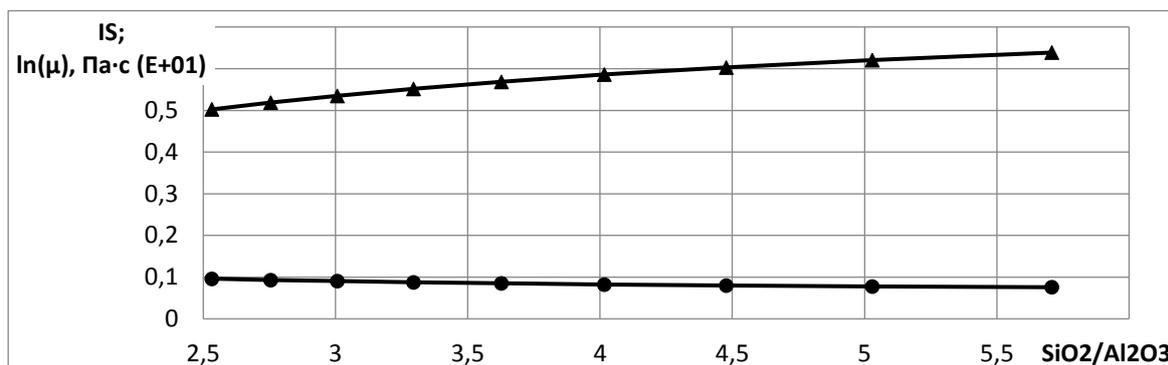
▲ – $\ln(\mu)$; ● – IS

Figure 3. Dependence of slagging index and viscosity on the SiO_2 / Al_2O_3 ratio Moscow region coal.

▲ – $\ln(\mu)$; ● – IS

Рис. 3. Зависимость индекса шлакования и вязкости от отношения SiO_2 / Al_2O_3 Подмосковский

уголь.



▲ – ln(μ) ; • -SI

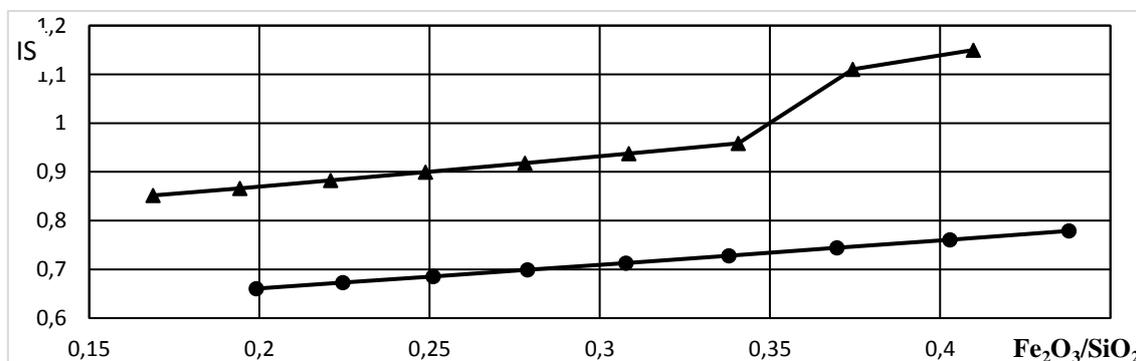
Figure 4. Dependence of slagging index and viscosity on the SiO_2 / Al_2O_3 ratio Irsha-Borodinsky coal.

▲ – ln(μ) ; • -SI

Рис. 4. Зависимость индекса шлакования и вязкости от отношения SiO_2 / Al_2O_3 Ирша-Бородинский уголь.

На рис.5 приведены зависимости IS от отношения Fe_2O_3 / SiO_2 в золе для углей Ирша-Бородинского и Подмосковского бассейна. Показано, что до значений отношения, равному примерно 0.33 обе зависимости имеют прямую пропорциональную

зависимость, больше этого значения IS Ирша-Бородинского угля резко увеличивается. Объясняется это превышением содержания Fe_2O_3 в золе величины 15 %, которая принята как критическая в методике расчета (табл.4).



▲ – Irsha-Borodinsky coal ISH (E-01); • -Moscow region coal

Figure 5. Dependence Effect of changing the Fe_2O_3 / SiO_2 ratio in ash on the slagging index.

▲ – Ирша-Бородинский уголь IS(E-01); • -Подмосковный уголь

Рис. 5. Влияние изменения отношения Fe_2O_3 / SiO_2 в золе на индекс шлакования.

Выводы

1. Разработана методика ранжирования углей по склонности их к шлакованию поверхностей нагрева топок энергетических котлов, на основе которой можно предварительно определить годность непроектного угля для сжигания вместо проектного по показателю индекса шлакования.

2. Методика представлена на основе известного полуэмпирического метода расчета Watt-Fereday с поправкой Vomkamp на содержание в золе MgO для расчета плавкостных и вязкостных характеристик золы. Индекс шлакования IS для ранжирования углей кроме химического состава золы учитывает ее расход и концентрацию на основе приведенной зольности A^{pr} , рассчитываемой как частное от

деления рабочей зольности и низшей теплоты сгорания на рабочую массу топлива.

3. Проведено ранжирование 28 углей различных марок (бурые, каменные, антрацит), сжигаемых на электростанциях России, по их склонности к образованию золовых отложений в топках энергетических котлов. Выделены 2 месторождения угля, как бурого в Восточной Сибири, так и каменного в Западной Сибири, универсальных при переходе на сжигание непроектного топлива с точки зрения предотвращения шлакования.

4. Величина IS прямо пропорционально зависит от рабочей зольности A_r и с ростом последней увеличивается и потенциал шлакования поверхностей нагрева. IS для угля Подмосковского бассейна, зола которого склонна к шлакованию, примерно на порядок больше, чем для Ирша-Бородинского, величина IS для которого одна из наименьших. Вязкость при этом примерно одинакова. Объясняется этот факт существенно большей приведенной зольности в первом случае.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00722, <https://rscf.ru/project/22-19-00722/>

Литература (References)

- [1] Maidanik M.N., Verbovetski E.K., Tugov A.N. Preliminary assessment of the possibility to shift thermal power plant boilers for burning alternative coal. *Thermal Engineering* 2021. T. 68. №9. C.690-697.
- [2] McLennen A.R., Bryant G.W., Bailey C.W, Stanmore B.R., Wall T.F. Index for iron based slagging for pulverized coal firing in oxidizing and reducing conditions. *Energy Fuel*. 2000, 14, 349-354.
- [3] Lawrence A., Kumar R., Nandakumar K. A novel tool for assessing slagging propensity of coals in PF boiler. *Fuel*. 2008, 87, 946-950.
- [4] Browning G.J., Bryant G.W., Hurst H.J., Lucas J.A., Wall T.F. An empirical method for the prediction of coal ash slag viscosity. *Energy Fuel*, 2003, 17, 731-737.
- [5] Walsh P.M., Sayre A.N., Loehden D.O., Monroe L.S., Beer J.M., Sarofim A.F. Deposition of bituminous coal ash in an isolated heat exchange tube: effects of coal properties on deposit growth. *Prog. Energy Combust Sci.* 1990, 16, 327-346.
- [6] Degereji M.U., Ingham D.B., Ma L., Pourkashanian M., Williams A. Numerical assessment of coals/blends slagging potential in pulverized coal boilers. *Fuel*. 2012, 102, 345-353.
- [7] Gupta S.K., Wall N.F., Greelman R.A., Gupta R.P. Ash fusion temperatures and transformation of coal ash particulates to slag. *Fuel. Proc. Technol.* 1998, 56, 33-43.
- [8] Dachuan Wang, Qinfeng Liang, Xin Gong, Haifeng Liu. Influence of coal blending on ash fusion property and viscosity. *Fuel* 189(2017) 15-22.
- [9] Mingke Shen, Kunzan Qiu, Long Zhang, Zhenyu Huang, Zhihua Wang, Jianzhong Liu. Influence of coal blending on ash fusibility in reducing atmosphere. *Energies* 2015, 8, 4735-4754.
- [10] Durgun D., Genc A. Effects of coal properties on the production rate of combustion solid residue. *Energy* 34 (2009) 1975-1979.
- [11] Sheng C. et al. A computational fluid dynamics based study of the combustion characteristics of coal blends in pulverised coal-fired furnace // *Fuel*. – 2004. – Т. 83. – №. 11-12. – С. 1543-1552.
- [12] Degereji M.U., Ingham D.B., Ma L., Pourkashanian M., Williams A. Prediction of ash slagging propensity in a pulverized coal combustion furnace. *Fuel* 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2010.12.038>.
- [13] Su S., Pohl J.H., Holcomb D. Fouling propensities of blended coals in pulverized coal-fired power station boilers. *Fuel* 82 (2000) 1653-1667.
- [14] Goni Ch, Helle S., Garcia X., Gordon A., Parra R., Kelm U., Jimenes R., Ilfaro G. Coal blend combustion: fusibility ranking from mineral matter composition. *Fuel* 82 (2003) 2087-2095.
- [15] Alekhovich A.N. Calculation of the viscosity of molten slag and its use in analyzing the applicability of off-design coals. *Thermal Engineering*. 2003. T. 50. № 12. P. 987-993.
- [16] Alekhovich A.N. Initial slagging temperature as a coal slagging index: determination and application. *Power Technology and Engineering*. 2014. T.48. №3. P. 210-217.
- [17] Wigley F., Williamson J., Jones AR. Slagging indices for UK coals and their relationship with mineral matter. *Fuel Proc Technol* 1990, 24, 383-389.
- [18] Watt J.D., Ferreday F. The flow properties of slag formed from the ashes of British coals. Part 1: viscosity of homogeneous liquid slag in relation to slag composition. *J. Inst. Fuel* 1969, 42, P. 99-103.
- [19] Vargas S., Frandsen F.J., Dam-Johansen K. Rheological properties of high-temperature melts of coal ashes and other silicates. *Progress in Energy Combustion Science* 2001, 27, P. 237-429.
- [20] Yin C., Luo Z, Ni M, Cen K. Predicting coal ash fusion temperature with the back propagation neural network model. *Fuel* 1998;77(15):1777-1782.
- [21] Dachuan Wang, Qinfeng Liang, Xin Gong, Haifeng Liu, Xia Liu Influence of coal blending

on ash fusion property and viscosity. Fuel 189 (2017) 15-20.

[22] Mingke She, Kunzan Qiu, Long Zhang, Zhenyu Huang, Zhihua Wang and Jianzhong Liu. Influence of Coal Blending on Ash Fusibility in Reducing Atmosphere, Energies 2015, 8, 4735-4754.

[23] Chao Tong, Xigang Yang, Guoqing Chen, Yong Zhang, Lulu Chen, Yang Zhou, Tengfei He, Baosheng Jin. Experimental investigation for the combustion characteristics of blends of three kinds of coal. Fuel 300 (2021) 12093-7.

[24] Chakravarty, S.; Mohanty, A.; Banerjee, A.; Tripathy, R.; Mandal, G.K.; Basariya, M.R.;

Sharma, M. Composition, mineral matter characteristics and ash fusion behavior of some Indian coals. Fuel 2015, 150, 96-101.

[25] Browning GJ, Bryant GW, Hurst HJ, Lucas JA, Wall TF. An empirical method for the prediction of coal ash slag viscosity. Energy Fuel 2003; 17:731-7.

[26] Rushdi A, Gupta R, Sharma A, Holcombe D. Mechanistic prediction of ash deposition in a pilot-scale test facility. Fuel 2005;84:1246-58.

Сведения об авторах.



Чернов Сергей Львович, кандидат технических наук, доцент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, струйные и вихревые течения.
E-mail: chernovserl@gmail.com



Прохоров Вадим Борисович, кандидат технических наук, профессор кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: котельные установки, аэродинамика горения, охрана окружающей среды, моделирование.
E-mail: ProkhorovVB@mpei.ru



Пай Артем Викторович, старший преподаватель кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, теплоснабжение, численное моделирование.
E-mail: PaiAV@mpei.ru



Апаров Владимир Дмитриевич, студент кафедры ТЭС НИУ «МЭИ». Область научных интересов: теплоэнергетика, котельные установки, горелочные установки.
E-mail: AparovVD@mpei.ru