

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО, ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ИЗУЧЕНИЕ ШЛАКУЮЩИХ СВОЙСТВ “МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ” УГЛЕЙ¹

© 2022 г. М. Ю. Чернецкий^a, *, Е. Б. Бутаков^a

^aИнститут теплофизики Сибирского отделения РАН,
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: micch@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2021 г.

После доработки 18.04.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Предварительная интенсивная механическая обработка угля является одной из перспективных технологий в теплоэнергетике, поскольку позволяет существенно повысить его реакционную способность. При таком воздействии на уголь происходит значительное преобразование его минеральной части, изменение характеристик газового и золowego потоков при сжигании, что может привести как к снижению, так и к увеличению загрязнения поверхности нагрева котла. До настоящего времени в мировой практике отсутствовали работы, связанные с изучением влияния “механоактивации” углей на интенсивность образования отложений. Для углей разной степени метаморфизма: бурого угля Канско-Ачинского бассейна и каменного угля Экибастузского бассейна – установлены закономерности изменения температуры начала шлакования при измельчении в разных по степени энергонапряженности мельницах. Приведены результаты исследования интенсивности шлакования при сжигании угольной пыли бурых углей после измельчения в мельнице дезинтеграторного типа. Для расчетов применяли универсальный CFD-пакет программ SigmaFlow. В математическую модель, которая была использована при проведении исследований, входили подмодели турбулентного реагирующего газового потока, модели движения, теплообмена, горения угольных частиц и образования шлаковых отложений. Для учета особенностей протекания процесса горения “механоактивированных” углей в модель были добавлены реакционные свойства и скорости выхода летучих и горения угольного остатка. Расчеты интенсивности шлакования при сжигании угольной пыли бурых углей показали, что температура начала шлакования после измельчения в дезинтеграторе повышается на 40–60°C.

Ключевые слова: пылеугольное топливо, шлакование, дезинтегратор, “механоактивация”, численное моделирование, коэффициент шлакования, температура начала шлакования, набегающий поток

DOI: 10.1134/S0040363622010015

Одним из возможных вариантов предварительной подготовки низкосортного угля для использования его в качестве топлива является “механоактивация”, т.е. размол при высокоэнергетическом воздействии. Данный способ обработки существенно повышает реакционную способность угольной пыли [1, 2]. Но при таком воздействии на уголь происходит значительное преобразование его минеральной части, изменение характеристик газового и золowego потоков при сжигании, что может привести как к снижению, так и к увеличению загрязнения поверхности нагрева котла. Установление закономерностей процесса образования отложений (шлакования) при сжигании пыли угля, прошедшего предваритель-

ную интенсивную механическую обработку в мельницах с высокоэнергетическим воздействием, является до сих пор не решенной задачей.

Степень интенсивности шлакования определяется температурой газового потока, выше которой при пылеугольном сжигании интенсивность резко возрастает. Ее определение возможно при проведении экспериментальных исследований с помощью зонда, рабочий участок которого помещен в газозод котла или стенда [3].

На основе результатов экспериментальных работ были предложены способы расчетов температуры шлакования с помощью эмпирических выражений [4]. Наиболее информативным способом определения взаимного влияния химических и физических свойств угольного топлива, его минеральной части и конструктивно-режимных параметров сжигания угля на шлакование является

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-01005).

Неохлаждаемый зонд представляет собой трубку из нержавеющей стали диаметром 32 мм и длиной 315 мм.

Для расчетов использовали универсальный CFD-пакет программ SigmaFlow [11]. Математическая модель, которую применяли в данной работе, включает в себя различные подмодели. В нее входят подмодели турбулентного реагирующего газового потока, модели движения, теплообмена, горения угольных частиц и образования шлаковых отложений. Для учета особенностей протекания процесса горения “механоактивированных” углей в модель были добавлены реакционные свойства и скорости выхода летучих и горения угольного остатка из работы [2].

Для оценки налипания частицы на стенку топочной камеры использовали модель на основе температуры начала шлакования $\vartheta_{\text{шл}}$. Количественную оценку интенсивности образования шлаковых отложений выполняли с помощью коэффициента шлакования [8]

$$k_{\text{шл}} = \frac{gf}{g_3},$$

где g – интенсивность шлакования, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; f – площадь поперечного сечения зонда, м^2 ; g_3 – количество золы, набегавшей на зонд, $\text{кг}/\text{с}$.

Уравнения сохранения для газовой фазы записываются в виде обобщенного закона сохранения в контрольном объеме [12]. Для вычисления диффузионных потоков на гранях контрольного объема применяют центрально-разностную схему, имеющую второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовали схему квадратичной интерполяции против потока (схему QUICK), в значительной степени минимизирующую схемную вязкость. Для связи полей скорости и давления использовали SIMPLE-C-процедуру. При расчете процесса течения газа учитывали взаимный обмен импульсом и энергией между газом и частицами с использованием Particle-Source-In-Cell (PSI-CELL)-метода.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При расчете температуры начала шлакования рассматривали угли, измельченные в разных по степени энергонапряженности мельницах – шаровой барабанной и дезинтеграторе. Распределение угольных частиц (остаток R на сите) по их размеру d показано на рис. 2. Распределение минеральных компонентов по фракциям угольной пыли при измельчении на таких мельницах было заимствовано из работы [13].

На рис. 3, а видна существенная неравномерность распределения минеральных компонентов по размерным фракциям d_3 золы бурого угля после его измельчения в ШБМ по сравнению с рас-

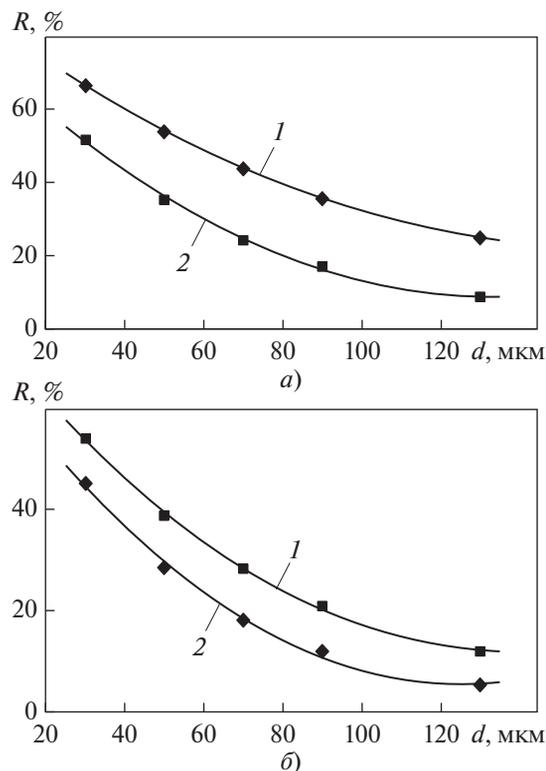


Рис. 2. Распределение R угольных частиц бурого (а) и экибастузского каменного (б) углей после измельчения в ШБМ (1) и дезинтеграторе (2)

пределением после измельчения в дезинтеграторе. Это влияет и на зависимость температуры начала шлакования от размеров золотых частиц – после измельчения угля в дезинтеграторе (рис. 3, б) $\vartheta_{\text{шл}}$ изменяется незначительно. Так, при $d_3 = 30$ – 140 мкм температура шлакования $\vartheta_{\text{шл}}$ составляет 992 – 1000°C . При измельчении в ШБМ с увеличением размера частиц от 30 до 140 мкм $\vartheta_{\text{шл}}$ возрастает на 35°C . Это объясняется более равномерным распределением минеральных компонентов после измельчения угля в дезинтеграторе.

Измельчение экибастузского угля приводит к более равномерному распределению минеральных компонентов и, как следствие, к более равномерным температурам шлакования (рис. 3, в, г). Так, для угля, измельченного в ШБМ, при увеличении размера частиц от 30 до 130 мкм температура $\vartheta_{\text{шл}}$ возрастает с 1077 до 1111°C . Измельчение угля в дезинтеграторе приводит не только к меньшему диапазону изменения температуры $\vartheta_{\text{шл}}$ (от 1102 до 1081°C), но и к иному характеру ее изменения – более мелкие частицы имеют более высокую температуру начала шлакования.

Как было сказано ранее, для оценки взаимного влияния химических, физических свойств угольного топлива, его минеральной части и конструктивно-режимных параметров сжигания на

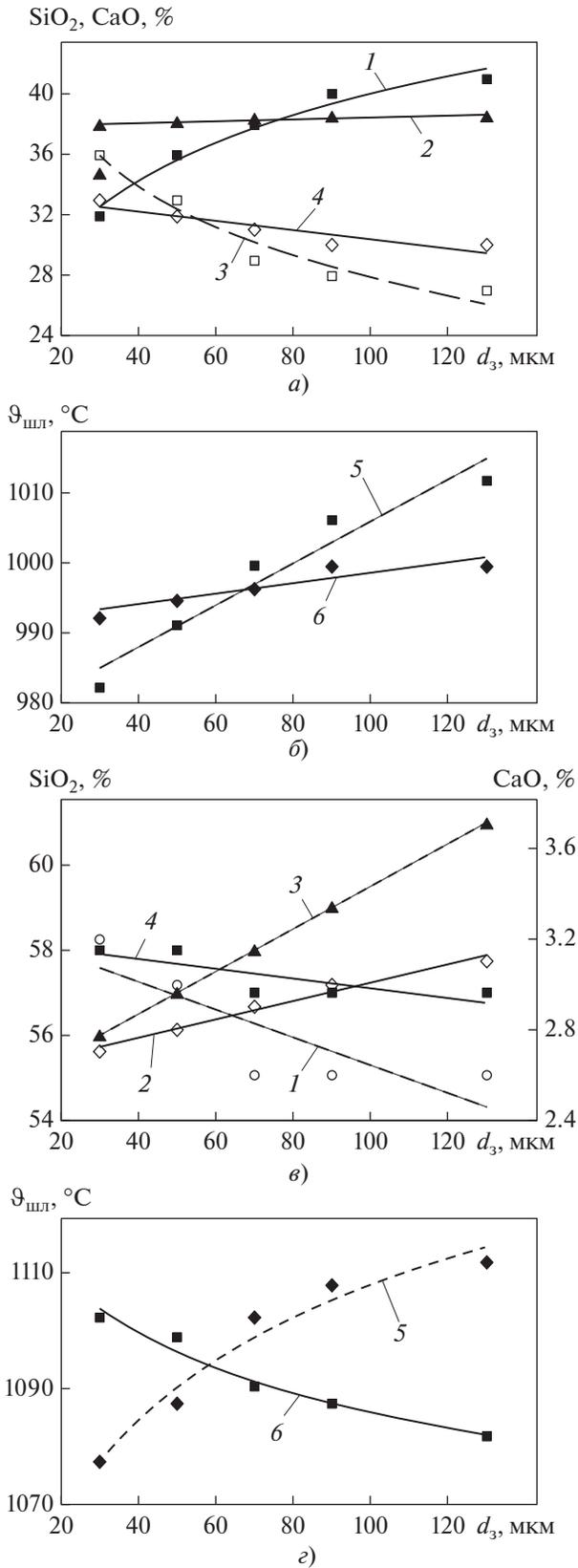


Рис. 3. Зависимость содержания минеральных компонентов (а, в) CaO (1, 2), SiO_2 (3, 4) и температуры шлакования (б, з) от размера частиц золы бурого (а, б) и экибастузского каменного (в, з) углей после измельчения в ШБМ (1, 3, 5) и дезинтеграторе (2, 4, 6)

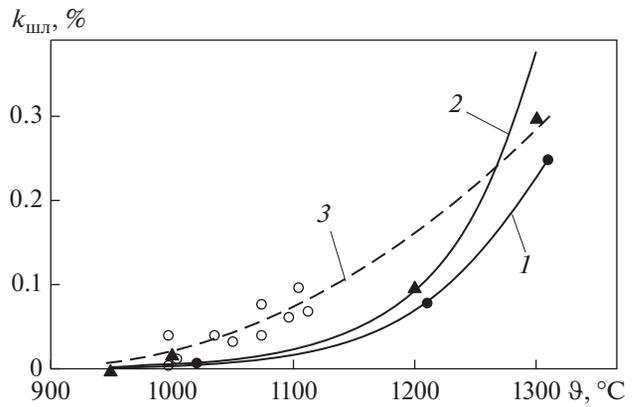


Рис. 4. Зависимость коэффициента шлакования при сжигании бурого угля от температуры набегающего потока газов. 1 – расчетные данные после измельчения на дезинтеграторе; 2, 3 – расчетные и экспериментальные данные для стандартного помола

шлакование наиболее подходящим инструментом является численное моделирование. При моделировании камеры сжигания стенда с использованием пакета программ SigmaFlow применяли сетку, содержащую примерно 700000 ячеек.

Далее представлен технический и элементный составы бурого угля, %:

W^r	30.0
A^d	12.0
V^{daf}	46.0
C^{daf}	71.4
H^{daf}	4.0
S^{daf}	0.3
O^{daf}	22.9
Q_s^{daf}	26.1 МДж/кг

Химический состав золы бурого угля, %, приведен далее:

SiO_2	31.26
Al_2O_3	9.617
TiO_2	0.47
Fe_2O_3	12.42
CaO	38.67
MgO	6.22
K_2O	0.39
Na_2O	0.05

В табл. 1 представлены варианты расходных характеристик угля и воздуха.

На рис. 4 приведены результаты расчетов коэффициента шлакования в зависимости от темпера-

Таблица 1. Варианты расходных характеристик воздуха и бурого угля

Вариант	$V_{\text{п}}, \text{м}^3/\text{ч}$	$V_{\text{в}}, \text{м}^3/\text{ч}$	$B_{\text{п}}, \text{кг}/\text{ч}$	$B_{\text{в}}, \text{кг}/\text{ч}$	α
1	361	289	90	50	1.29
2	353	278			1.25
3	320	250			1.15
4	297	232			1.05

Примечание. $V_{\text{п}}, V_{\text{в}}$ – расход первичного и вторичного воздуха; $B_{\text{п}}, B_{\text{в}}$ – расход угля с первичным и вторичным воздухом; α – коэффициент избытка воздуха.

Таблица 2. Температура набегающих газов и коэффициент шлакования для бурого угля

Вариант	$\vartheta, ^\circ\text{C}$, после измельчения		$k_{\text{шл}}$ после измельчения	
	в дезинтеграторе	в ШБМ	в дезинтеграторе	в ШБМ
1	950	950	0.001	0.001
2	1020	1000	0.01	0.02
3	1210	1200	0.08	0.10
4	1310	1300	0.25	0.30

туры набегающего потока. При достижении температур 1040–1080°C наблюдается интенсификация процесса осаждения частиц. Согласно [3] такие температуры соответствуют температуре начала шлакования. В табл. 2 приведены температуры набегающих на зонд газов, а также коэффициент шлакования в зависимости от начальных условий.

На рис. 4 представлены также расчетные данные по интенсивности шлакования для бурого угля, измельченного в ШБМ. При стандартном помоле температура начала шлакования (интенсификация процесса осаждения частиц) на 40–60°C ниже, чем для “механоактивированного” угля.

ВЫВОДЫ

1. Впервые установлены закономерности изменения температуры начала шлакования бурых углей Канско-Ачинского бассейна и каменных углей Экибастузского бассейна, предварительно измельченных в мельнице дезинтеграторного типа.

2. Температура начала шлакования бурых углей после измельчения в дезинтеграторе составляет 1040–1080°C, что на 40–60°C ниже, чем для углей стандартного помола.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Welham N.J., Chapman P.G.** Mechanical activation of coal // *Fuel. Proc. Technol.* 2000. V. 68. Is. 1. P. 75–82. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00106-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00106-5)
2. **Autothermal** combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor / A.P. Burdakov, V.I. Popov, T.S. Yusupov, M.Yu. Chernetskiy, K. Hanjalic // *Fuel*. 2014. V. 122. P. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.018>
3. **Методика** определения шлакующих свойств твердых топлив в промышленных и стендовых условиях. М.: ВТИ, 1984.
4. **Алехнович А.Н.** Температура начала шлакования как показатель шлакующих свойств: прогнозирование, влияние схем и режимов сжигания. Ч. 2 // *Электрические станции*. 2014. № 4. С. 22–31.
5. **Wacławiak K., Kalisz S.** A practical numerical approach for prediction of particulate fouling in PC boilers // *Fuel*. 2012. V. 97. P. 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.007>
6. **Kreutzkam B., Wieland C., Spliethoff H.** Improved numerical prediction of ash formation and deposition using a novel developed char fragmentation model // *Fuel*. 2012. V. 98. P. 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.02.056>
7. **Чернецкий М.Ю., Алехнович А.Н., Дектерев А.А.** Математическая модель шлакования топки пылеугольного котла // *Теплоэнергетика*. 2012. № 8. С. 39–47.
8. **Чернецкий М.Ю., Бутаков Е.Б., Кузнецов В.А.** Расчет процесса образования шлаковых отложений при сжигании угольной пыли в топочной камере огневого стенда // *Труды Академэнерго*. 2020. № 1. С. 95–106.
9. **Алехнович А.Н.** Шлакование энергетических котлов. Челябинск: ЧФПЭИпк, 2006.
10. **Алехнович А.Н.** Уточнение расчетной схемы закрепления частиц и роста шлаковых отложений // *Теплоэнергетика*. 2008. № 9. С. 10–14.
11. **Использование** программы SigmaFlow для численного исследования технологических объектов / А.А. Дектерёв, А.А. Гаврилов, Е.Б. Харламов, К.Ю. Литвинцев // *Вычислительные технологии*. 2003. Т. 8. Ч. 1. С. 250–255.
12. **Патанкар С.** Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984.
13. **Преобразование** минеральной части бурого угля Канско-Ачинского бассейна и каменного угля Экибастузского бассейна при их измельчении в дезинтеграторе / М.Ю. Чернецкий, Е.Б. Бутаков, А.В. Кузнецов, А.П. Бурдуков // *Химия твердого топлива*. 2019. № 4. С. 9–17.

Studying the Slagging Properties of Mechanically Activated Coals

M. Yu. Chernetskii^{a, *} and E. B. Butakov^a

^a *Institute of Thermal Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

^{*}*e-mail: micch@yandex.ru*

Abstract—Intense mechanical pretreatment of coal is among promising technologies in thermal engineering owing to its ability to achieve essentially higher coal reactivity. In being subjected to such treatment, the coal's mineral part becomes significantly transformed, and a change occurs in the gas and ash flows during combustion, which may result in either lower or higher fouling of the boiler's heating surface. Till now, there have been no activities in the world practices on studying the effect that the “mechanical activation” of coals has on the deposit formation intensity. For coals characterized by different degrees of metamorphism, specifically, brown coal from the Kansk–Achinsk basin and black coal from the Ekibastuz basin, regularities pertinent to the change in the slagging onset temperature after pulverization in mills having different degrees of energy intensity are established. Results from studying the slagging intensity in burning the dust of brown coals after their having been pulverized in a disintegrating mill are given. The numerical analyses were carried out by applying the universal SigmaFlow CFD software package. The mathematical model used in carrying out the studies comprised the submodels of a reacting turbulent gas flow and models of motion, heat transfer, coal particle combustion, and slag deposit formation. For taking into account the specific features pertinent to the combustion of “mechanically activated” coals, the model was supplemented with the reaction properties, volatile release rates, and coal residue burning rates. The numerical analyses of slagging intensity in burning pulverized brown coals have shown that the slagging onset temperature becomes by 40–60°C higher after having been pulverized in a disintegrator.

Keywords: pulverized coal fuel, slagging, disintegrator, “mechanical activation”, numerical modeling, slagging index, slagging onset temperature, incident flow