УДК 544.452.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ, ПОЛУЧЕННОЙ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ, В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРЕВА

М. Ю. Чернецкий^{1,2}, А. П. Бурдуков¹, Е. Б. Бутаков¹, И. С. Ануфриев¹,
П. А. Стрижак³

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, micch@yandex.ru

²Сибирский Федеральный Университет, 660074 Красноярск

³Томский политехнический университет, 634050 Томск

В трубчатой печи проведена серия экспериментальных исследований воспламенения угольной пыли, полученной при измельчении угля в мельничных устройствах с высокой энергонапряженностью. Впервые определены эффективные кинетические константы воспламенения угольной пыли, измельченной в виброцентробежной мельнице и мельнице-дезинтеграторе, в условиях высокоскоростного нагрева. Показана зависимость скорости выхода летучих веществ от способа измельчения угольного вещества.

Ключевые слова: воспламенение, горение, пылеугольное топливо, механоактивация, дезинтегратор, кинетические константы.

DOI 10.15372/FGV20160311

ВВЕДЕНИЕ

Повышение эффективности горения и газификации угольной пыли является одной из первоочередных задач при разработке новых, экологически чистых технологий использования угольного топлива для производства энергии. Повысить скорость горения и газификации твердого топлива можно за счет увеличения реакционной поверхности угольных частиц при измельчении. Для этого используют разные типы измельчителей — мельничных устройств, различающихся как по затратам энергии на помол топлива, так и по способу воздействия на твердое вещество: раздавливание, истирание, стесненный удар, свободный удар. При этом в угольной энергетике считалось, что способ измельчения угля (при получении одних и тех же размеров частиц) не оказывает воздействия на реакционную способность измельченного материала. Но, как показали лабораторные [1, 2] и полупромышленные исследования [3], способ измельчения влияет на реакционные характеристики топлива. В частности, визуальные наблюдения за

факелом угля, измельченного до одинакового фракционного состава в мельниц, виброцентробежной и мельнице-дезинтеграторе, свидетельствуют о более быстром воспламенении и выгорании топлива, прошедшего обработку в дезинтеграторе. Основное отличие рассматриваемых мельниц заключается в способе воздействия на угольное вещество: в виброцентробежной мельнице — истирание и стесненный удар угля, в дезинтеграторе — свободный удар.

При интенсивном механическом воздействии на уголь в мельницах с высокой энергонапряженностью происходит существенное изменение угольного вещества: изменение пористой структуры и образование новых активных поверхностей; появление интенсивных электрических полей, электронной эмиссии, свободных радикалов; химические изменения, связанные с разрывом химических связей органических веществ угля, изменением молекулярно-массового распределения; образование растворимых продуктов и летучих веществ. При этом, как показывает эксперимент, изменения более выражены для углей, измельченных в дезинтеграторе, чем в виброцентробежной мельнице, что отражается на увеличении реакционной способности угля в первом случае.

Все проведенные ранее лабораторные ис-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01079-а).

© Чернецкий М. Ю., Бурдуков А. П., Бутаков Е. Б., Ануфриев И. С., Стрижак П. А., 2016.

следования реакционных свойств механоактивированного угля были выполнены с помощью термогравиметрического анализа (ТГА) [1, 2] при нагреве образца со скоростью $5 \div 20$ °С/мин до температуры $500 \div 600$ °С.

В данной работе представлены результаты количественной оценки влияния типа измельчения на реакционные свойства угольной пыли в условиях высокоскоростного нагрева, выраженные в виде эффективных кинетических констант воспламенения. Для углей, богатых летучими веществами, эти константы характеризуют скорость выхода летучих. Изучение воспламенения угольной пыли проводили в вертикальной трубе с нагревателем (обмоткой), что позволяло по всей длине трубы поддерживать постоянную температуру. Нагреваемая кварцевая трубка диаметром 40 мм располагалась вертикально. Её нижний конец был открыт, верхний соединен переходником с питателем. Угольная пыль подавалась в камеру сгорания импульсным питателем. Навеска пыли двигалась в камере со скоростью витания. Стоящий на входе фотодиод улавливал прохождение потока пылевзвеси, тем самым определялась скорость частиц, а фотодиод на выходе фиксировал вспышку. Для измерения температуры внутри печи использовалась платиновая термопара диаметром 0.1 мм с системой внутренней компенсации холодного спада.

Для проб угля, предварительно измельченных в мельнице, проведена серия из 10 экспериментов при одной и той же постоянной температуре стенок камеры. В дальнейшем осуществлялось понижение температуры на 10 °С. В табл. 1 приведены результаты измерения времени от подачи пыли в трубу до фиксации вспышки фотодиодом для каменного угля Кузнецкого бассейна, в табл. 2 — для бурого угля.

Для нахождения кинетических констант воспламенения угольной пыли, характеризующих процесс выхода летучих веществ, выпол-

Таблица 1
Результаты оценки времени воспламенения
пыли кузнецкого угля

Тип мельницы	Время воспламенения пыли, с		
	600 °С	610 °С	620 °С
Виброцентробежная	1.18	0.874	0.678
Дезинтегратор	1.11	0.864	0.6125

Таблица 2
Результаты оценки времени воспламенения
пыли бурого угля

Тип мельницы	Время воспламенения пыли, с		
	540 °С	550 °С	560 °С
Виброцентробежная	1.12	0.83	0.565
Дезинтегратор	0.94	0.744	0.5

нено сопоставление времени воспламенения потока пылевзвеси, полученного расчетным путем, с данными аналогичного эксперимента.

Задача о самовоспламенении в потоке с учетом реагирования комплекса частиц решалась аналитически в предположении о адиабатических условий в камере. В безразмерном виде уравнение для воспламенения можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{\theta^2} \exp\left(-\frac{1}{\theta}\right), \quad (1)$$

при $\theta = \theta_0$, $\tau = 0$. Здесь θ — безразмерная температура, τ — безразмерное время.

Уравнение (1) универсально для любых топлив и режимных параметров. Резкий подъем температуры свидетельствует о самовоспламенении. Значение τ в данный момент соответствует времени от начала процесса до наступления самовоспламенения τ_b^0 . В координатной системе $\lg \tau_b^0 = f(1/\theta_0)$ зависимость времени, в течении которого произойдет самовоспламенение при заданном значении θ_0 , выражается прямой линией:

$$\lg \tau_b^0 = \frac{A}{\theta_0} - B, \quad (2)$$

где A — тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, B — значение $\lg \tau_b^0$ при $1/\theta_0 = 0$. Значения A и B зависят от точности решения уравнения и аппроксимации полученных решений. С достаточной для практических расчетов точностью они могут быть приняты равными $A = 0.322$ и $B = 2.824$ [4]. Безразмерное время выражается через размерные параметры следующим образом:

$$\tau_b^0 = t \frac{Q_H^P \beta C_0 \mu_0 f K_0 273^2 R^3}{c E^3}, \quad (3)$$

где K_0 — предэкспоненциальный множитель, м/с, E — энергия активации, Дж/моль, Q —

Таблица 3
Кинетические константы воспламенения
пыли кузнечного и бурого углей

Уголь	Тип мельницы	E , Дж/моль	K_0 , м/с
Кузнечный	Виброцентробежная	122 585	$2.98 \cdot 10^5$
	Дезинтегратор	116 133	$1.13 \cdot 10^5$
Бурый	Виброцентробежная	129 295	$2.47 \cdot 10^6$
	Дезинтегратор	116 649	$2.34 \cdot 10^6$

теплота сгорания топлива при постоянном давлении, Дж/кг, β — стехиометрический коэффициент, C_0 — начальная концентрация кислорода, кг/м³, μ_0 — начальная концентрация топлива, кг/м³, f — удельная поверхность угольной пыли, м²/кг, R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · °С), t — время, с, c — теплоемкость пылевоздушной смеси, Дж/(м³ · °С).

Удельная поверхность угольной пыли рассчитывалась по среднему диаметру каждой фракции. Анализ размеров частиц проводился на приборе «Микросайзер 201». Можно отметить, что отличие во фракционном составе после измельчения а мельницах двух типов составляло примерно 10 %. Более мелкая пыль получена при измельчении в дезинтеграторе.

Для нахождения кинетических параметров воспламенения на основе выражения (3) использовался подход, представленный в работе [4]. Кинетические константы для кузнечного и бурого угля представлены в табл. 3, и харак-

теризуют они в первую очередь воспламенение и горение летучих. Полученные результаты — эффективные кинетические константы воспламенения — свидетельствуют о влиянии способа измельчения на реакционные характеристики угольной пыли. Наблюдается снижение энергии активации после измельчения в дезинтеграторе по сравнению с виброцентробежной мельницей.

Итак, в работе впервые получены эффективные кинетические константы в условиях высокоскоростного нагрева углей, измельченных в мельничных устройствах с высокой энергонапряженностью. Показана зависимость скорости выхода летучих веществ от способа измельчения угольного вещества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурдуков А. П., Попов В. И., Ломовской О. И., Юсупов Т. С. Влияние механической активации на горение углей в факеле // Химия в интересах устойчивого развития. — 2009. — Т. 17, № 5. — С. 471–478.
2. Burdukov A. P., Popov V. I., Yusupov T. S., Chernetskiy M. Yu., Hanjalic K. Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor // Fuel. — 2014. — V. 122. — P. 103–111.
3. Burdukov A. P., Popov V. I., Chernetskiy M. Yu., Dekterev A., Hanjalic K. Mechanical activation of micronized coal: prospects for new combustion applications // Appl. Therm. Eng. — 2015. — V. 74. — P. 174–181.
4. Виленский Т. В., Хзмалян Д. М. Динамика горения пылевидного топлива. — М.: Энергия, 1977.

Поступила в редакцию 8/V 2015 г.,
в окончательном варианте — 13/X 2015 г.