

УДК 544.452.1

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

М. Ю. Чернецкий<sup>1,2</sup>, А. П. Бурдуков<sup>1</sup>, Е. Б. Бутаков<sup>1</sup>, И. С. Ануфриев<sup>1</sup>,  
П. А. Стрижак<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, 660074 Красноярск

<sup>3</sup>Томский 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

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 мельницах двух типов, 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, с 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) и Российского научного фонда (проект № 15-19-10003).

© 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. Ее 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 платинородиевая термопара диаметром 0.1 мм с системой внутренней компенсации холодного спая.

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 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  $\theta$  — безразмерная температура,  $\tau$  — безразмерное время.

Уравнение (1) универсально для любых топлив и режимных параметров. Резкий подъем температуры свидетельствует о самовоспламенении. Значение  $\tau$  в данный момент соответствует времени от начала процесса до наступления самовоспламенения  $\tau_b^0$ . В координатной системе  $\lg \tau_b^0 = f(1/\theta_0)$  зависимость времени, в течение которого произойдет самовоспламенение при заданном значении  $\theta_0$ , 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 кузнецкого и бурого углей

Уголь	Тип мельницы	$E$ , Дж/моль	$K_0$ , м/с
Кузнецкий	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,  $\beta$  — стехиометрический коэффициент,  $C_0$  — начальная концентрация кислорода, кг/м<sup>3</sup>,  $\mu_0$  — начальная концентрация топлива, кг/м<sup>3</sup>,  $f$  — удельная поверхность угольной пыли, м<sup>2</sup>/кг,  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · °С),  $t$  — время, с,  $c$  — теплоемкость пылевоздушной смеси, Дж/(м<sup>3</sup> · °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 в 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 кузнецкого и бурого углей приведены в табл. 3, и характе-

ризуют 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.