

УДК 536.468

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ГОРЕНИЕ УГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Кузнецов Артем Валерьевич¹,
temkansu@yandex.ru

Бутаков Евгений Борисович¹,
e_butakov@mail.ru

¹ Институт теплофизики СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Солнечная, 1/1.

Ужесточение требований к повышению эффективности топливоиспользования и защите окружающей среды от вредных выбросов явилось мощным стимулом для развития новых перспективных технологий использования твердого топлива, позволяющих решить эколого-экономические проблемы. В связи с этим необходимость повышения качества угольного топлива, изучения и улучшения реакционных свойств углей различной степени метаморфизма имеет значимую практическую применимость.

Цель работы: создание методики и исследование влияния процесса механоактивационного измельчения на химическую активность углей различной степени метаморфизма.

Методы исследования: изучение процесса термоокислительной деструкции с помощью термогравиметрического анализа, определение температуры самовоспламенения угольной пылевзвеси в вертикальной трубчатой печи, расчет констант реакции горения и энергии активации.

Результаты. Получены первые оценки влияния механоактивационного измельчения на химическую активность угольной пылевзвеси с помощью дифференциально-термического анализа. Создан экспериментальный стенд, разработана и апробирована методика определения температуры пылевзвеси. Получены первые результаты по использованию методики измерения температуры воспламенения пылевзвеси углей различной стадии метаморфизма для изучения их кинетических характеристик в процессе воспламенения. Получены энергия активации и константа скорости реакции для бурого и каменного углей, измельченных на различных мельницах. Для бурого угля, измельченного на виброцентробежной мельнице, энергия активации и константа скорости реакции составила 115385 кДж/моль и $1,97 \cdot 10^7$ м/с, а для угля, полученного на дезинтеграторе, – 103126 кДж/моль и $2,24 \cdot 10^6$ м/с. Эти же величины были получены и для каменного угля, 125000 кДж/моль и $1,26 \cdot 10^7$ м/с, 124185 кДж/моль и $1,23 \cdot 10^7$ м/с соответственно. Полученные в ходе выполнения работ результаты являются новыми. Новизна состоит в использовании особых экспериментальных подходов и в обработке данных для оценки кинетических констант процессов выхода летучих веществ и горения коксового остатка применительно к углям, прошедшим предварительную высокоэнергетическую обработку.

Ключевые слова:

Микропомол, энергия активации, механоактивация, термоокислительная деструкция, термогравиметрический анализ, дезинтегратор.

Введение

Уголь – самое распространенное в мире и в России энергетическое топливо, поэтому повышение его реакционных свойств с приближением их к газомазутным топливам несомненно актуально. Установленный в ИТ СО РАН факт повышения химической активности углей при механоактивационном измельчении позволяет расширить области использования углей в энергетических технологиях. При этом актуальным становится определение химической активности углей при их механической обработке. На первой стадии исследования нами использовался термогравитационный метод, требующий значительного времени при скорости нагрева образцов – 10–30 °С/мин, что не сопоставимо с реальными процессами горения пылеугольного топлива. Поэтому предпринята попытка использования методики определения химической активности на стадии воспламенения по температуре вспышки.

Известно, что воспламенение пылевзвеси может протекать гомогенно – в объеме вокруг частицы, или гетерогенно – с прямым воздействием кислорода по всей поверхности угольной частицы. В зависимости от содержания летучих веществ и

размера частиц возможны различные механизмы воспламенения.

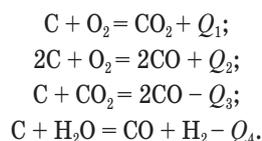
Один из методов регистрации воспламенения основывается на фиксации температуры в вертикально нагретой трубе. Один из первых примеров подобного способа изучения воспламенения предложен в работе Godbert–Greenwald (G-G) [1]. В дальнейшем данный метод совершенствовался, модифицировался в зависимости и от вида топлива [2, 3].

Воспламенение и горение угольной пыли

Натуральное твердое топливо состоит из минеральной и органической частей. В состав органической части входит углерод, кислород, водород, азот и сера; эти элементы принимают непосредственное участие в процессе горения и определяют горючую массу топлива. Энергетическая ценность твердого топлива заключена в его горючей части, которая состоит из летучих веществ и коксового остатка. В зависимости от степени метаморфизма угля в нем содержится различное количество летучих веществ, отличающихся по энергетической ценности. Чем больше геологический возраст твердого топлива, тем выше его теплотворная способ-

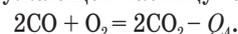
ность и ниже содержание летучих. Температура начала выхода летучих также зависит от возраста угля. У бурых углей летучие начинают выделяться при подогреве ~ 170 °С, а у антрацита ~ 380–400 °С. Летучие представляют собой смесь газов разложения и паров конденсирующихся веществ, содержащихся в угле. Наличие летучих в твердом топливе упрощает его воспламенение, так как их горение начинается при более низкой температуре. Основным этапом в процессе горения углей является горение углерода в коксовом остатке, так как в нем заключена основная энергетическая ценность.

Горение пылеугольного факела – сложный физико-химический процесс, включающий в себя целый ряд химических, теплофизических и аэродинамических явлений. Поэтому при практическом рассмотрении горения индивидуальных частиц, как базового принципа пылеугольного факела приходится схематизировать процессы, но для качественной оценки отдельных стадий и процесса в целом их существенно упрощают. Имеется много литературных данных по экспериментальному исследованию отдельных стадий горения угольной частицы, в которых представлено чаще всего использование определенного вида угля при определенных условиях, таких как скорость нагрева, размер частиц и температурный уровень процесса. Время выхода летучих коррелирует с временем прогрева частицы, которое достаточно просто рассчитывается [4]. Двойственная природа горючей части твердого топлива позволяет выделить две характерные стадии процесса горения. Первая стадия – это подготовка топлива к горению, в течение которой происходит сушка топлива, разложение и выход летучих веществ и их горение. Эта стадия занимает около 10 % времени горения топлива. Вторая стадия – стадия горения кокса, которая занимает значительное время. Эта стадия начинается сразу после окончания выхода и сгорания летучих, характеризуется быстрым разогревом коксовой массы и ее выгоранием. Горение коксового остатка, в свою очередь, определяется целым рядом факторов: реакционной способностью полукокса, зольностью угля, аэродинамической обстановкой в камере сгорания, пористостью частицы, уровнем температур. При рассмотрении горения углерода принято считать, что на внешней поверхности частиц и на поверхности пор происходят следующие итоговые гетерогенные реакции, обобщенно представляющие многостадийные адсорбционно-десорбционные механизмы химических превращений:



Первые две реакции являются экзотермическими, а третья и четвертая – эндотермическими. Тепловые эффекты очень слабо зависят от температу-

ры и для практических расчетов могут быть приняты равными: $Q_1=395$ кДж/моль, $Q_2=219$ кДж/моль, $Q_3=176$ кДж/моль. Кроме гетерогенных реакций существенное влияние на горение частицы может оказывать гомогенная реакция горения окиси углерода в окружающей частицу газовой среде:



Пятая реакция является экзотермической и ее тепловой эффект составляет:

$$Q_4 = 2Q_1 - Q_2 = 571 \text{ кДж/моль.}$$

Согласно диффузионно-кинетической теории горения угля [5] суммарная скорость гетерогенной реакции

$$q = K^1 C_w = \frac{K C_0}{1 + K/\beta} = \frac{C_0}{1/K + 1/\beta},$$

где сопротивление переходу вещества из окружающей среды

$$\text{к реагирующей частице } \frac{1}{K^1} = \frac{1}{K} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{K} + \frac{d}{\text{Nu}D},$$

то есть состоит из химического $1/K$ и диффузионного $d/\text{Nu}D$ сопротивлений. Здесь величина K^1 – суммарная константа скорости химической реакции; β – коэффициент массоотдачи; K – константа скорости реакции; C_0 и C_w – концентрации окислителя в объеме и на поверхности; D – коэффициент диффузии окислителя в газе; ($\text{Nu} = \text{Bd}/D \approx 2$) – число Нуссельта. Константа скорости реакции обычно определяется по соотношению Аррениуса $K = K_0 \exp(-E/RT)$, где K_0 – предэкспоненциальный множитель; E – энергия активации; R – газовая постоянная; T – температура. В случае горения при высоких температурах основное сопротивление в процессе – диффузия $d/\text{Nu}D$, при малых размерах частиц или низких температурах основное сопротивление – химическое. Поэтому выделяется два предельных режима процесса горения: кинетический и диффузионный. В реальном процессе воспламенения и горения частиц в пылеугольном факеле в топке котла, где реализуются переменная температура частиц топлива при их движении в потоке и полифракционный состав частиц (на стадиях выделения и горения летучих и догорания коксового остатка), возможно изменение режима горения от внешнего кинетического до внешнего переходного и внешне- и внутренидиффузионного. Детальное экспериментальное исследование всех стадий процесса горения полидисперсных частиц представляется достаточно сложной задачей. Однако даже упрощенный анализ соотношений позволяет сделать очевидные выводы: для увеличения скорости сгорания частиц угля следует повышать температуру процесса и уменьшать диффузионное сопротивление. Повышение температуры сопряжено с рядом экологических и технологических проблем, связанных с плавкостью золы, образованием окислов азота, условиями работы материалов и т. д. [6, 7]. Именно поэтому в промышленных топочных устройствах максимальная температура в объеме не превышает 1500–1700 °С.

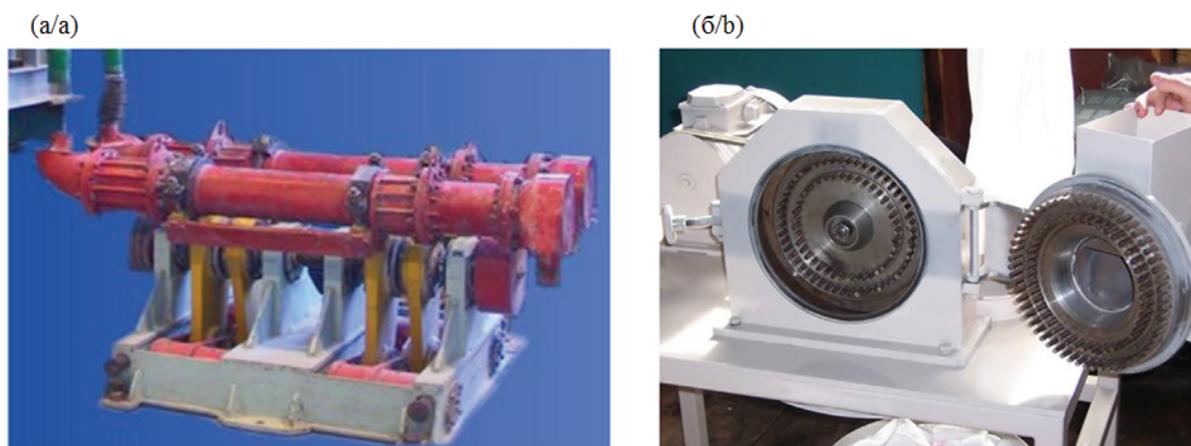


Рис. 1. Энергонапряженные мельницы: а) виброцентробежная; б) дезинтегратор

Fig. 1. Energy-intensive mills: a) vibrocentrifugal; b) disintegrator

Механическая активация твердого топлива

Тонина помола (микрпомол) является важнейшим показателем эффективности работы помольных мельниц [8, 9]. При создании системы механоактивационного измельчения решающим фактором является выбор наиболее эффективного и технически просто реализуемого способа измельчения, позволяющего максимально увеличить химическую активность топлив. Для решения этой проблемы было проведено исследование влияния способов измельчения углей различных стадий метаморфизма в энергонапряженных мельницах различного типа – виброцентробежных, планетарных, дезинтеграторах (рис. 1) [10].

На первом этапе нами использовались методы дифференциально-термического анализа, позволяющие исследовать в процессе термического разложения реакционные свойства углей, подвергнутых механохимической обработке [11, 12]. Этот метод позволяет анализировать процессы термоокислительной деструкции (ТОД) угольного вещества, нагреваемого со скоростью 10–30 °С в минуту, что, конечно, отличается от реального нагрева, воспламенения и горения частиц в пылеугольном факеле в топочной камере.

В качестве объектов исследования использованы пробы углей Кузнецкого угольного бассейна марок Д и Т с зольностью $A^c=6,46\%$ и $6,15\%$ и выходом летучих компонентов $V^{daf}=41\%$ и $12,4\%$ соответственно. Пробы подвергались сверхтонкому диспергированию в мельницах, отличающихся видом механических воздействий – использовался дезинтегратор, для которого характерно ударное разрушение, и центробежно-планетарная мельница типа М-3 с истирающе-раздавливающим видом воздействия при отношении массы мелющих тел к углю 10:1.

На рис. 2 приведены кривые изменения энергии активации в процессе ТОД. Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что интен-

сивная механическая обработка высокометаморфизованного угля повышает его реакционную способность, проявляющуюся в снижении величины энергии активации по всему температурному интервалу термоокислительной деструкции. Однако степень снижения величины этого показателя по сравнению с низкометаморфизованным длиннопламенным углем существенно ниже.

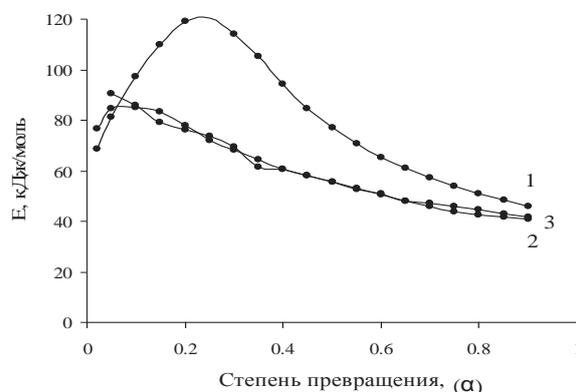


Рис. 2. Изменение энергии активации длиннопламенного угля в процессе термоокислительной деструкции: 1 – исходный образец; 2 – обработанный в дезинтеграторе; 3 – легкая фракция ($d < 1,4 \text{ г/см}^3$)

Fig. 2. Change of activation energy of long-flame coal at thermal oxidative degradation: 1 is the original sample; 2 is the sample processed in the disintegrator; 3 is the light fraction ($d < 1,4 \text{ g/cm}^3$)

Анализируя данные дифференциально-термического анализа углей различных стадий метаморфизма (рис. 2), следует отметить, что в начальной стадии термического разложения значения энергии активации в ряде случаев у исходного и механоактивированного углей могут быть близки и существенное изменение энергии активации E наблюдается после ~20 % степени термического разложения. В связи с этим оценка влияния эффекта механоактивации углей должна производиться по

результатам реагирования не только в начальной стадии процесса, но и в значительной части (до 50 %) процесса выгорания пылевзвеси.

Определение температуры воспламенения угольной пыли, подвергнутой механической активации

Продолжительность анализа при использовании методики дифференциально-термического анализа (ДТА) – довольно большая величина, в течение которой возможно изменение термических свойств углей, прошедших механохимическую активацию [13–15]. В связи с этим нами была разработана методика и создана экспериментальная установка по определению кинетических характеристик углей микропомола на основе изменения температуры вспышки навески угля в пылевзвеси, т. е. в начальной стадии воспламенения факела. Схема стенда представлена на рис. 3 [16–20]. В эксперименте используются угли, прошедшие обработку в дезинтеграторе и виброцентробежной мельнице, с похожим спектром размеров, – каменный уголь Кузнецкого бассейна и бурый уголь, оба с высоким выходом летучих веществ.

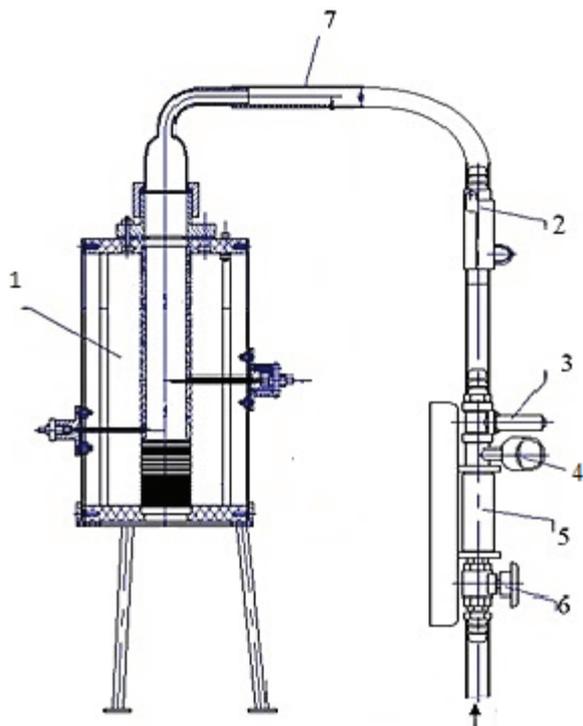


Рис. 3. Экспериментальный стенд по воспламенению угольной пылевзвеси: 1 – печь; 2 – держатель пыли; 3 – электромагнитный клапан; 4 – манометр; 5 – газовый баллон; 6 – шаровой клапан; 7 – шланг

Fig. 3. Experimental stand for coal dust ignition: 1 is the furnace; 2 is the dust holder; 3 is the electromagnetic valve; 4 is the manometer; 5 is the gas cylinder; 6 is the ball valve; 7 is the hose

Условия проведения экспериментов соответствуют теоретической модели процесса: начальные температуры воздуха и стенок камеры одина-

ковы. Угольная пыль в камеру сгорания подается импульсным питателем, позволяющим навеске пыли в камере сгорания двигаться со скоростью витания. Контролируется температура в камере сгорания и момент воспламенения, а также измеряется время нахождения угольной пыли в печи до момента вспышки.

Для проб углей, предварительно измельченных в виброцентробежной мельнице и мельнице-дезинтеграторе, проводилась серия экспериментов из 10 опытов при одной и той же постоянной температуре стенок камеры экспериментальной установки. После 10 опытов осуществлялось понижение температуры на 10 градусов. В ходе эксперимента измерялось время от начала поступления угольной пыли в камеру до момента фиксации вспышки фотодиодом. Для углей, богатых летучими веществами, вспышка в первую очередь характеризует процесс выхода и воспламенения летучих веществ. На рис. 4 приведены результаты экспериментов для кузнецкого и бурого угля. Можно видеть, что вероятность воспламенения (количество воспламенений из 10 опытов) возрастет с увеличением температуры. При этом влияние способа измельчения на вероятность воспламенения оказалось несущественным.

В табл. 1 и 2 приведены характерные времена воспламенения угольной пыли кузнецкого и бурого угля. Можно видеть, что для угольной пыли, измельченной в мельнице дезинтеграторного типа, время воспламенения оказывается меньше, по сравнению с виброцентробежной мельницей, при одинаковых температурах стенок камеры.

Таблица 1. Результаты оценки времени воспламенения для пыли кузнецкого угля

Table 1. Results of evaluation of ignition time for kuznetsk coal dust

Тип мельницы Type of mill	Время воспламенения пыли Dust ignition time		
	600 °C, c (s)	610 °C, c (s)	620 °C, c (s)
Виброцентробежная мельница Vibrocentrifugal mill	1,18	0,874	0,678
Дезинтегратор Disintegrator	1,11	0,864	0,6125

Таблица 2. Результаты оценки времени воспламенения для пыли бурого угля

Table 2. Results of evaluation of ignition time for brown coal dust

Тип мельницы Type of mill	Время воспламенения пыли Dust ignition time		
	540 °C, c (s)	550 °C, c (s)	560 °C, c (s)
Виброцентробежная мельница Vibrocentrifugal mill	1,12	0,83	0,565
Дезинтегратор Disintegrator	0,94	0,744	0,5

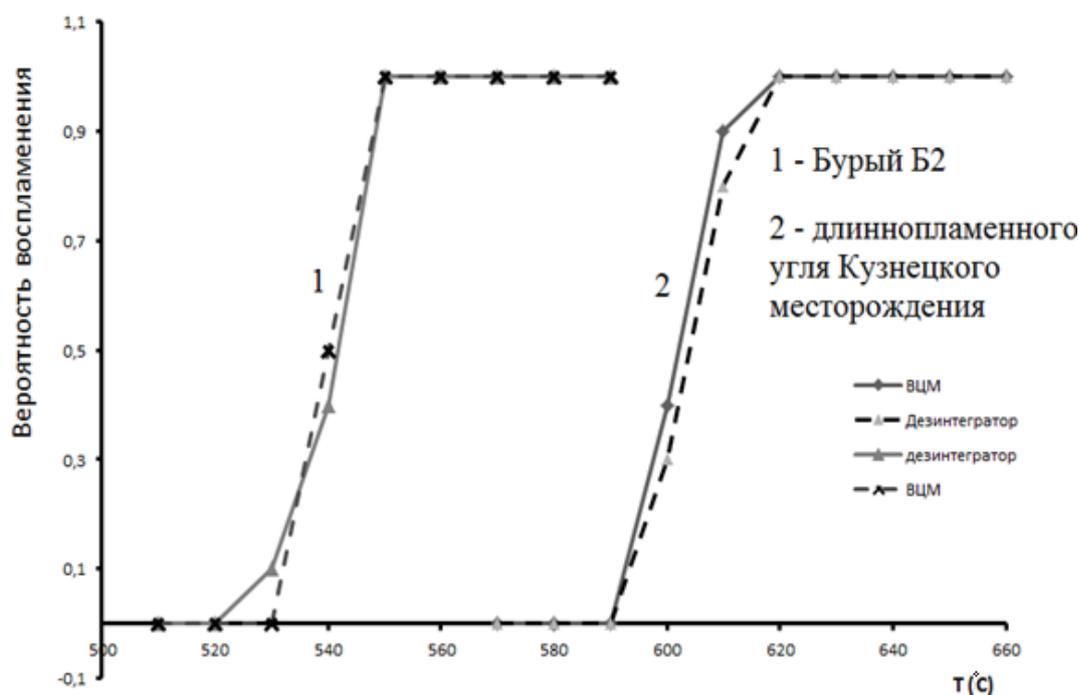


Рис. 4. Зависимость вероятности воспламенения от температуры длиннопламенного угля Кузнецкого месторождения и бурого угля Б2

Fig. 4. Dependence of ignition probability on the temperature of long-flame coal of Kuznetsk deposits and brown coal B2

Для нахождения кинетических констант процесса воспламенения угольной пыли, характеризующего процесс выхода летучих веществ, было выполнено сопоставление времени воспламенения потока пылевзвеси, полученного расчетным путем, с данными из аналогичного эксперимента.

Таблица 3. Кинетические константы для пыли каменного и бурого угля

Table 3. Kinetic constants for dust of hard and brown coal

Тип измельчительного устройства Type of grinding device	Тип угля Type of coal	E , кДж/моль E , kJ/mol	K_0 , м/с K_0 , m/s
Виброцентробежная мельница Vibrocentrifugal mill	Каменный Hard	125000	$1,26 \cdot 10^7$
Дезинтегратор Disintegrator		124185	$1,23 \cdot 10^7$
Виброцентробежная мельница Vibrocentrifugal mill	Бурый Brown	115385	$1,97 \cdot 10^7$
Дезинтегратор Disintegrator		103126	$2,24 \cdot 10^6$

Обработка полученных экспериментальных данных дала возможность определить кинетические константы для каменного угля Кузнецкого месторождения и бурого угля (табл. 3). По полученным результатам можно отметить, что для кузнецкого угля не была отмечена зависимость энергии активации от способа измельчения угольной пыли, тогда как для бурого угля наблюдается сни-

жение энергии активации после измельчения на дезинтеграторе по сравнению с виброцентробежной мельницей.

Полученные в ходе выполнения работ результаты являются новыми. Новизна состоит в использовании новых экспериментальных подходов и обработке данных для оценки кинетических констант процессов выхода летучих веществ и горения коксового остатка применительно к углям, прошедшим предварительную высокоэнергетическую обработку. Так, для определения кинетических констант процесса выхода летучих веществ по температуре самовоспламенения пылевзвеси в вертикальной нагреваемой трубе используется малая длина трубы и малые скорости пылевоздушного потока по сравнению с подобными работами.

Выводы

1. В результате исследования с помощью метода дифференциально-термического анализа кинетики термического разложения механоактивированных углей микропомола установлено изменение химической активности углей после их измельчения.
2. Для установления реального механизма воспламенения пылевзвеси углей различных стадий метаморфизма необходимо дальнейшее совершенствование данной методики с возможностью детального анализа воспламенения на различных стадиях процесса воспламенения и горения летучих веществ, коксового остатка, что

позволит использовать методы определения кинетических характеристик с применением гомогенной и гетерогенной теории воспламенения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Godbert A.L., Greenwald H.P. Laboratory studies of the inflammability of coal dusts. – Washington, U.S. Bureau of Mines, 1935. – Bulletin 389.
2. Combustion possibility of low rank Russian peat as a blended fuel of pulverized coal fired power plant / Jae Kwan Kim, Hyun Dong Lee, Hyoung Suk Kim, Ho Young Park, Sung Chul Kim // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2014. – V. 20. – P. 1752–1760.
3. Research on characteristic parameters of coal-dust explosion / Weiguoa Cao, Liyuana Huang, Jianxinb Zhang, Sen XU, Shanshana Qiu, Feng Pan // Procedia Engineering. – 2012. – V. 45. – P. 442–447.
4. Резняков А.Б. Горение натурального твёрдого топлива. – Алма-Ата: Наука, 1968. – 365 с.
5. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твёрдого топлива. – М.: АН СССР, 1958. – 600 с.
6. Использование механоактивированных углей микропомола в энергетике / А.П. Бурдуков, В.И. Попов, В.А. Фалеев, Т.С. Юсупов // Ползуновский вестник. – 2010. – № 1. – С. 93–98.
7. Чернецкий М.Ю. Совершенствование моделирования теплообмена в пылеугольных топочных камерах с твердым шлакоудалением: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2012. – 161 с.
8. Burdukov A.P., Popov V.I., Faleev V.A. Study of mechanically activated coal combustion // Thermal Science. – 2009. – V. 13/1. – P. 127–138.
9. Effect of mechanochemical activation on coal combustion in torch / A.P. Burdukov, V.I. Popov, V.I. Lomovsky, T.S. Yusupov // Chemistry for Sustainable Development. – 2009. – V. 17. – P. 465–472.
10. Бурдуков А.П., Попов В.И., Чернова Г.В. Эффективность технологии использования механоактивированных углей микропомола для розжига и подсветки угольных котлов действующих ТЭС и проблемы ее внедрения // Горение твердого топлива: труды VII Всероссийской конференции. – Новосибирск, 2012. – С. 231–237.
11. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres / Lei Cai, Chun Zou, Yang Liu, Kai Zhou, Qingsong Han, Chuguang Zheng // Fuel. – 2015. – V. 139. – P. 198–205.
12. Briceland C.L., Khinkis M.J., Waibel R.T. Combustion Characteristics of Fine-Ground Coal // Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack Proc. Int. Symp. – Akron, Ohio, 1983. – Paper no. 10.
13. Yong Chen, Shigekatsu Mori, Wei-Ping Pan. Studying the mechanisms of ignition of coal particles by TG-DTA // Thermochimica Acta. – 1996. – V. 275. – P. 149–158.
14. Burdukov A.P., Konovalov V.V., Yusupov T.S. Prospects for use of micronized coal in power industry // Thermal Science. – 2002. – V. 6/1. – P. 29–42.
15. Burdukov A.P., Popov V.I. Investigation of pulverized coal combustion. Springer, 2007. – P. 131–140.
16. Computational modeling of autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal / M.Yu. Chernetskiy, A.A. Dekterev, A.P. Burdukov, K. Hanjalić // Fuel. – 2014. – V. 135. – P. 443–458.
17. Tolvanen H., Kokko L., Raiko R. Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling // Fuel. – 2013. – V. 111. – P. 148–165.
18. Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor / A.P. Burdukov, V.I. Popov, T.S. Yusupov, M.Yu. Chernetskiy, K. Hanjalić // Fuel. – 2014. – V. 122. – P. 103–111.
19. Modelling in-furnace phenomena of pulverized coal injection in ironmaking blast furnace: Effect of coke bed porosities / Yansong Shen, Aibing Yu, Peter Austin, Paul Zulli // Minerals Engineering. – 2012. – V. 33. – P. 54–65.
20. Influence of pyrolysis temperature on char optical texture and reactivity / M.J.G. Alonso, A.G. Borrego, D. Alvarez, J.B. Parra, R. Menendez // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2001. – V. 58–59. – P. 887–909.

Поступила 10.11.2015 г.

Информация об авторах

Кузнецов А.В., аспирант кафедры физики неравновесных процессов, инженер-исследователь Института теплофизики СО РАН.

Бутаков Е.Б., аспирант кафедры физики неравновесных процессов, инженер-исследователь Института теплофизики СО РАН.

UDC 536.468

INVESTIGATION OF MECHANICAL ACTIVATION INFLUENCE ON COAL FUEL COMBUSTION

Artem V. Kuznetsov¹,
temkansu@yandex.ru

Evgeniy B. Butakov¹,
e_butakov@mail.ru

¹ Kutateladze Institute of Thermophysics,
1/1, Solnechnaya street, Novosibirsk, 630090, Russia.

Toughening of requirements to enhance fuel efficiency and protect the environment from harmful emissions was a powerful stimulus for developing promising new technologies of using solid fuel, which allow solving environmental and economic problems. In this regard, the need of improving the quality of coal fuel, studying and improving the reaction properties of coals with different metamorphic grade is of significant practical applicability.

The main aims of the study are to develop the methods and to study the influence of mechanical activation grinding on reactivity of coals with different degree of metamorphism.

The method used in the study: investigation of thermooxidative degradation by thermogravimetric analysis; determination of auto-ignition temperature of coal dust in a vertical tube furnace; calculation of constants of the combustion reaction and activation energy.

The results. The authors have obtained the first estimates of mechanical activation grinding effect on coal dust reactivity using differential thermal analysis. The experimental stand was designed; the technique for determining dust temperature was developed and tested. The authors obtained the first results in using the methods of measuring ignition temperature of coals dust with various metamorphic stage to study their kinetic characteristics in inflammation. The activation energy and the reaction rate constant for lignite and hard coal, grinded at different mills, were obtained. For lignite, comminuted on vibrocentrifugal mill, the activation energy and reaction rate constant were 115385 kJ/mol and $1,97 \cdot 10^7$ m/s, and for coal obtained in the disintegrator they are 103126 kJ/mol and $2,24 \cdot 10^6$ m/s. The same values were obtained for hard coal – 125000 kJ/mol and $1,26 \cdot 10^7$ m/s, 124185 kJ/mol and $1,23 \cdot 10^7$ m/s respectively. The results obtained are new. The novelty is determined by the use of special experimental approaches and in data processing to estimate the kinetic constants of volatiles release and combustion of coke residue, with respect to coals after pre-high-energy treatment.

Key words:

Microgrinding, activation energy, mechanical activation, thermo-oxidative degradation, thermal gravimetric analysis, disintegrator.

The research was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation by the Agreement for grant no. 14.613.21.0005 (the unique identifier of the project RFMEFI61314X0005).

REFERENCES

- Godbert A.L., Greenwald H.P. *Laboratory studies of the inflammability of coal dusts*. Washington, U.S. Bureau of Mines, 1935. Bulletin 389.
- Jae Kwan Kim, Hyun Dong Lee, Hyoung Suk Kim, Ho Young Park, Sung Chul Kim. Combustion possibility of low rank Russian peat as a blended fuel of pulverized coal fired power plant. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2014, vol. 20, pp. 1752–1760.
- Weiguoa Cao, Liyuana Huang, Jianxinb Zhang, Sen XU, Shanshana Qiu, Feng Pan. Research on characteristic parameters of coal-dust explosion. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 45, pp. 442–447.
- Reznyakov A.B. *Gorenie naturalnogo tverdogo topliva* [Combustion of natural solid fuel]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1968. 365 p.
- Kantorovich B.V. *Osnovy teorii goreniya i gazifikatsii tverdogo topliva* [Foundations of the theory of combustion and gasification of solid fuels]. Moscow, AN USSR Publ., 1958. 600 p.
- Burdukov A.P., Popov V.I., Faleev V.A., Yusupov T.S. Ispolzovanie mekhanoaktivirovannykh ugley mikropomola v energetike [Use of mechanically activated microgrinding coals in energy sector]. *Polzunovskiy vestnik*, 2010, no. 1, pp. 93–98.
- Chernetskiy M.Yu. *Sovershenstvovanie modelirovaniya teploobmena v pyleugolnykh topchnykh kamerakh s tverdyim shlakoudaleniem*. Dis. Kand. nauk [Improving of heat transfer modeling in coal-fired furnace chambers of dry bottom. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2012. 161 p.
- Burdukov A.P., Popov V.I., Faleev V.A. Study of mechanically activated coal combustion. *Thermal Science*, 2009, vol. 13/1, pp. 127–138.
- Burdukov A.P., Popov V.I., Lomovsky V.I., Yusupov T.S. Effect of mechanochemical activation on coal combustion in torch. *Chemistry for Sustainable Development*, 2009, vol. 17, pp. 465–472.
- Burdukov A.P., Popov V.I., Chernova G.V. Effektivnost tekhnologii ispolzovaniya mekhanoaktivirovannykh ugley mikropomola dlya rozzhiga i podsvetki ugolnykh kotlov deystvuyushchikh TES i problemy ee vnedreniya [Efficiency of the technology of using mechanically activated microgrinding coals for ignition and lighting the existing coal-fired boilers of TPP and the problems of its implementation]. *Trudy VII Vserossiyskoy konferentsii «Gorenie tverdogo topliva»* [Proc. 7th Rus. Conf. Solid fuels burning]. Novosibirsk, 2012. pp. 231–237.
- Briceland C.L., Khinkis M.J., Waibel R.T. Combustion Characteristics of Fine-Ground Coal. *Combustion Diagnostics from Fuel Bunker to Stack Proc. Int. Symp.* Akron, Ohio, 1983. Paper no. 10.
- Chernetskiy M.Yu., Dekterev A.A., Burdukov A.P., Hanjalić K. Computational modeling of autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal. *Fuel*, 2014, vol. 135, pp. 443–458.
- Yong Chen, Shigekatsu Mori, Wei-Ping Pan. Studying the mechanisms of ignition of coal particles by TG-DTA. *Thermochimica Acta*, 1996, vol. 275, pp. 149–158.
- Burdukov A.P., Konovalov V.V., Yusupov T.S. Prospects for use of micronized coal in power industry. *Thermal Science*, 2002, vol. 6/1, pp. 29–42.

15. Burdukov A.P., Popov V.I. *Investigation of pulverized coal combustion*. Springer, 2007, pp. 131–140.
16. Lei Cai, Chun Zou, Yang Liu, Kai Zhou, Qingsong Han, Chuguang Zheng. Numerical and experimental studies on the ignition of pulverized coal in O₂/H₂O atmospheres. *Fuel*, 2015, vol. 139, pp. 198–205.
17. Tolvanen H., Kokko L., Raiko R. Fast pyrolysis of coal, peat, and torrefied wood: Mass loss study with a drop-tube reactor, particle geometry analysis, and kinetics modeling. *Fuel*, 2013, vol. 111, pp. 148–165.
18. Burdukov A.P., Popov V.I., Yusupov T.S., Chernetskiy M.Yu., Hanjalić K. Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor. *Fuel*, 2014, vol. 122, pp. 103–111.
19. Yansong Shen, Aibing Yu, Peter Austin, Paul Zulli. Modelling in-furnace phenomena of pulverized coal injection in ironmaking blast furnace: Effect of coke bed porosities. *Minerals Engineering*, 2012, vol. 33, pp. 54–65.
20. Alonso M.J.G., Borrego A.G., Alvarez D., Parra J.B., Menendez R. Influence of pyrolysis temperature on char optical texture and reactivity. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2001, vol. 58–59, pp. 887–909.

Received: 10 November 2015.

Information about the authors

Artem V. Kuznetsov, postgraduate, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics.

Evgeniy B. Butakov, postgraduate, research engineer, Kutateladze Institute of Thermophysics.