

УДК 544.452.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕАКТИВАЦИИ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ УГЛЕЙ МИКРОПОМОЛА

А. П. Бурдуков<sup>1</sup>, Е. Б. Бутаков<sup>1</sup>, А. В. Кузнецов<sup>1</sup>, М. Ю. Чернецкий<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, burdukov@itp.nsc.ru<sup>2</sup>Сибирский федеральный университет, 660074 Красноярск

Исследовано влияние механоактивационного измельчения углей на их воспламеняемость. В экспериментах сравнивались угли, прошедшие обработку на шаровой барабанной мельнице и механоактивированные, выдержанные некоторое время. Эксперименты показали снижение химической активности механоактивированных углей.

Ключевые слова: уголь, микропомол, механоактивация, деактивация, воспламенение, химическая активность, дезинтегратор.

DOI 10.15372/FGV20180104

### ВВЕДЕНИЕ

Ранее было установлено [1], что при измельчении в дезинтеграторе реакционная способность угольной пыли выше по сравнению с углем, измельченным в виброцентробежной и шаровой барабанной мельницах. Данный эффект установлен при исследовании угольной пыли без разделения на отдельные фракции. Но, как известно [3], при измельчении в дезинтеграторе размер получаемых при этом угольных частиц меньше, чем при других способах измельчения, и их доля значительно больше. При этом следует отметить, что практически при одинаковых спектрах размеров частиц после измельчения в дезинтеграторе и виброцентробежной мельнице скорость горения в первом случае значительно выше. При измерении энергии активации, определяющей химическую активность угля, методом дифференциально-термического анализа (ДТА) установлено значительное ее снижение при измельчении в дезинтеграторе, особенно после воспламенения и в последующих стадиях термического разложения. В процессе ДТА термическое разложение протекает достаточно медленно, что не соответствует реальному воспламенению и горению пылеугольного факела в топках котлов. Цель настоящей работы — сопоставить реакционную способность одинаковых по размерам угольных частиц, полученных разными способами измельчения, при их воспламенении, а также исследовать процес-

сы деактивации углей после значительной выдержки образцов угольной пыли, подвергнутых механоактивационному измельчению.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Была создана экспериментальная установка для исследования процесса воспламенения пылеугольного топлива, предварительно измельченного в разных по энергонапряженности и воздействию на угольное вещество мельницах. Схема стенда представлена на рис. 1. Основные элементы конструкции — печь, питатель угля, пусковой механизм, нагреватель воздуха.

Печь представляет собой теплоизолированную стальную трубу длиной 1 м с внутренним диаметром 40 мм, подвешенную вертикально. Электрообогрев осуществлялся с помощью системы низковольтных трансформаторов. По всей длине камеры сгорания, в специальных отверстиях с шагом 100 мм располагались фотодиоды и хромель-алюмелевые термодпары, предназначенные для регистрации вспышки и температуры соответственно. Для стабилизации температуры на входе в печь, а также удаления паразитных конвективных потоков и продуктов сгорания в камеру подается поток предварительного нагретого до температуры в камере воздуха со скоростью  $0 \div 100$  мм/с.

Пусковой механизм состоит из магнитного клапана и камеры объемом 45 мм<sup>3</sup>. Над клапаном находится питатель пыли, куда засыпа-

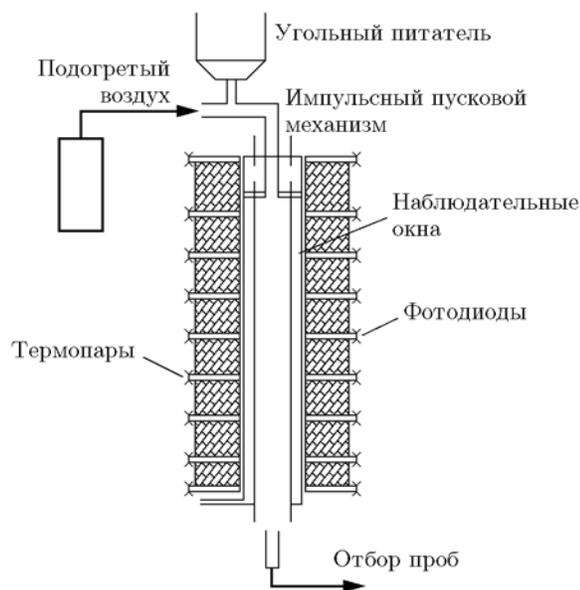


Рис. 1. Схема экспериментального стенда по изучению воспламенения угольной пыли

ются образцы массой  $0.1 \div 1$  г. Затем в камеру закачивается воздух (1 атм) и производится впрыск угольной пыли в печь. Максимальная температура, которую можно получить при использовании имеющихся трансформаторов, —  $1000$  °С. Поступление пыли в камеру сгорания регистрируется микрофоном, подключенным к АЦП L-Card. Вспышка регистрируется с помощью хромель-алюмелевых термопар и фотодиодов. Термопары подключены к модулю аналогового ввода данных МВА8, а тот в свою очередь — к компьютеру. Фотодиоды через усилитель подключены к АЦП L-Card EP 14-440, который подключен к компьютеру для записи полученных данных с использованием программы L-Graph.

Ранее [1–3] было показано, что степень и интенсивность измельчения значительно влияют на реакционную способность угля. В данной работе рассматривалось влияние способа

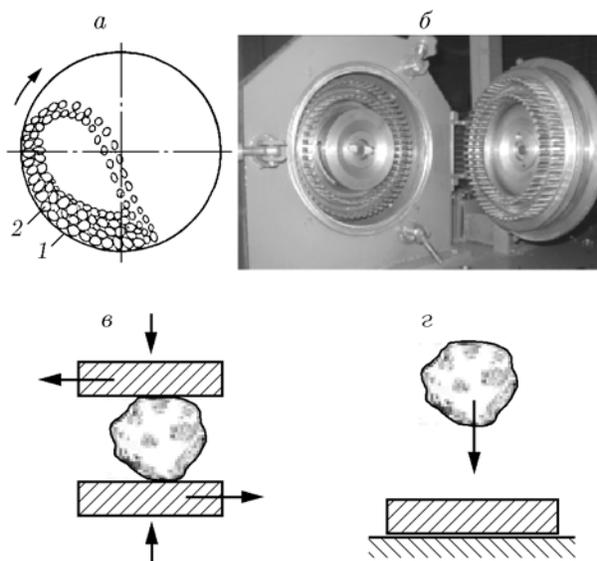


Рис. 2. Мельницы для измельчения:

а — шаровая барабанная мельница: 1 — барабан, 2 — мелющие тела; б — мельница ИТ СО РАН дезинтеграторного типа производительностью 150 кг/ч; в — истирание и стесненный удар; г — свободный удар

измельчения угольного топлива на реакционную способность фракционированной угольной пыли. В экспериментах использовались шаровая барабанная мельница (рис. 2, а) и мельница дезинтеграторного типа (рис. 2, б). Топливо — Кузнецкий каменный уголь. Технический и элементный анализ топлива выполнены в аккредитованной испытательной топливной лаборатории. Результаты технического анализа приведены в таблице.

С целью удаления внешней влаги, которая может в значительной степени повлиять на результаты эксперимента, уголь перед измельчением предварительно подсушивался в сушильном шкафу при температуре  $105$  °С в течение 4 ч. Были выполнены серия экспериментов с целью оценки влияния количества угольной пыли, загружаемой в камеру (0.1, 0.3 и 0.5 г), при

Характеристики каменного угля

$W^a$ , %	$A^d$ , %	$V^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$C^{daf}$ , %	$H^{daf}$ , %	$N^{daf}$ , %	$S^{daf}$ , %	$O^{daf}$ , %	$Q_s^{daf}$ , ккал/кг
5.4	22.3	34.7	44.7	75.57	5.66	1.78	0.55	16.44	7086

Примечания.  $W^a$  — влажность;  $A^d$  — зольность на сухую массу;  $V^d$  — выход летучих на сухую массу;  $V^{daf}$  — выход летучих на сухую беззольную массу;  $C^{daf}$ ,  $H^{daf}$ ,  $N^{daf}$ ,  $S^{daf}$ ,  $O^{daf}$  — соответственно углерод, водород, азот, сера, кислород в сухом беззольном состоянии;  $Q_s^{daf}$  — теплота сгорания в сухом беззольном состоянии.

постоянном количестве воздуха. При увеличении навески до  $0.3 \div 0.5$  г разброс результатов становился незначительным (до 5 %). Поэтому в дальнейших исследованиях массу навески брали равной 0.3 г.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для каждой из фракций при одной и той же температуре проводилась серия экспериментов из 10 опытов. Относительная ошибка измерения времени воспламенения не превышала 4 %. На рис. 3 показаны средние времена воспламенения пыли Кузнецкого каменного угля марки Д при разных температурах и спосо-

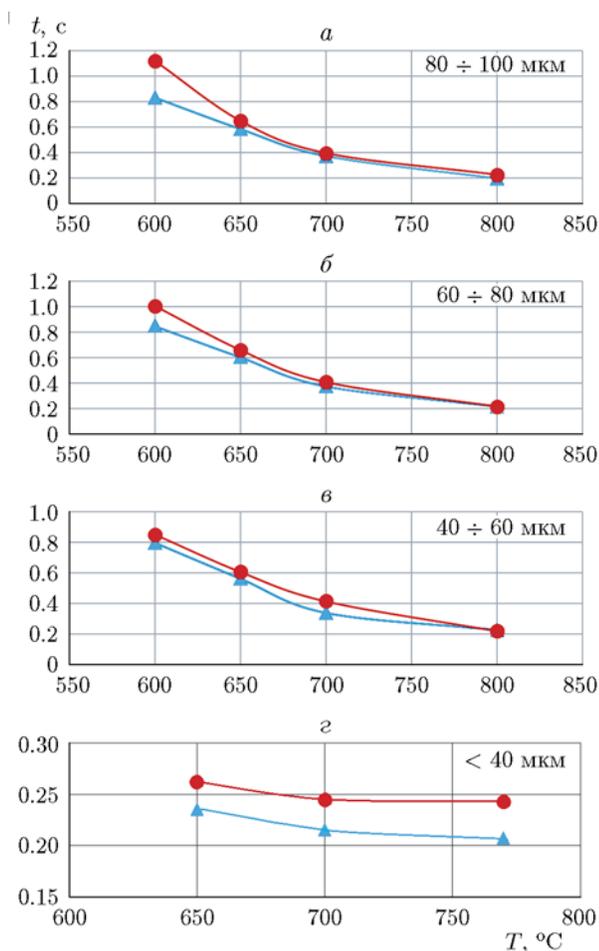


Рис. 3. Время воспламенения угольной пыли Кузнецкого каменного угля марки Д в зависимости от температуры для различных фракций:

кружки — после измельчения угля в дезинтеграторе, треугольники — в шаровой барабанной мельнице

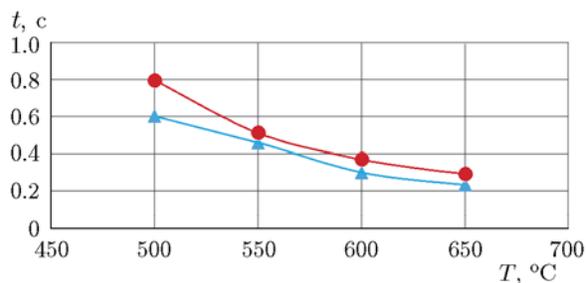


Рис. 4. Время воспламенения угольной пыли бурого угля фракции  $80 \div 100$  мкм в зависимости от температуры:

кружки — после измельчения угля в дезинтеграторе, треугольники — в шаровой барабанной мельнице

бах измельчения. Видно, что время воспламенения уменьшается с увеличением температуры и уменьшением размера угольных частиц. Но важно отметить, что после помола в шаровой барабанной мельнице время воспламенения меньше, чем в случае измельчения в дезинтеграторе, во всех рассматриваемых случаях. Аналогичный результат наблюдался и для угля другой степени метаморфизма — бурого (рис. 4). С увеличением температуры различия по времени воспламенения становятся меньше. Для самых малых размеров частиц, меньше 40 мкм, повышение температуры в рассматриваемом интервале незначительно сказывается на времени воспламенения, однако в [1, 2] показано, что измельчение в дезинтеграторе повышает реакционную способность угольной пыли. При этом надо отметить, что результаты работ [1, 2] получены на полупромышленном огневом стенде, где угольная пыль сразу после измельчения поступала в камеру сгорания.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что после измельчения в дезинтеграторе и некоторой временной выдержки возможна деактивация — снижение реакционной способности угольной пыли. Известно, что предварительное окисление уменьшает реакционную способность угля [4, 5]. Более низкая активность выдержанного угля объясняется исчезновением активных центров окисления.

Измельчение в дезинтеграторе позволяет достичь более полного раскрытия органоминеральных сростков по сравнению с измельчением в шаровой барабанной мельнице и делает уголь более активным. Но при этом возрастает скорость окисления на воздухе при комнат-

ной температуре. Просеивание угольной пыли также интенсифицирует процесс окисления угля при взаимодействии с кислородом воздуха и обуславливает снижение активности угля со временем.

Для оценки повышения реакционной способности угольной пыли при ее предварительном измельчении в дезинтеграторе с использованием проточного реактора требуется модернизация установки с целью сократить время от измельчения угля до его подачи в реакционную камеру, а также обеспечить рассев угольной пыли на ситах в инертной по отношению к углю среде, например аргоне.

При этом наблюдаемое снижение реакционной способности угольной пыли после измельчения в дезинтеграторе — деактивация угля — косвенно подтверждает изначальное более полное раскрытие органоминеральных сростков по сравнению с измельчением угля в шаровой барабанной мельнице.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Отмечено незначительное увеличение времени воспламенения углей микропомола в основном крупных фракций в сравнении с углями, обработанными в шаровой барабанной мельнице.

2. Результаты экспериментов подтвердили предположение о влиянии времени выдержки после измельчения на химическую активность углей.

3. Данные дериватографического анализа показывают значительное снижение энергии активации в интервале времени, превышающем начальный участок воспламенения, поэтому необходимо более детальное исследование процесса воспламенения и последующего возгорания угольной частицы.

4. Поскольку в предыдущих экспериментах установлен факт повышения химической активности углей микропомола непосредственно после измельчения, необходимы разработка методик и проведение исследований влияния времени выдержки углей после помола на их химическую активность.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чернецкий М. Ю., Бурдуков А. П., Бутаков Е. Б., Ануфриев И. С., Стрижак П. А. Исследование воспламенения угольной пыли, полученной при различной механической обработке, в условиях высокоскоростного нагрева // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 79–81.
2. Burdukov A. P., Butakov E. B., Popov V. I., Chernetskiy M. Y., Chernetskaya N. S. The use of mechanically activated micronized coal in thermal power engineering // Therm. Sci. — 2016. — V. 20. — P. s23–s33.
3. 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. — V. 122. — P. 103–111.
4. Карманова Н. Г., Карманов Н. С. Универсальная методика рентгенофлуоресцентного спектрометрического анализа горных пород на спектрометре FRL-9900XP // VII Всерос. конф. по рентгеноспектральному анализу, г. Новосибирск, 19–23 сентября 2011 г.: тез. докл.
5. Beamish B. B., Barakat M. A., George St. J. D. Spontaneous combustion propensity of New Zealand coals under adiabatic conditions // Intern. J. Coal Geol. — 2001. — V. 45, N 2–3. — P. 217–224. — DOI: 10.1016/S0166-5162(00)00034-3.

Поступила в редакцию 30/III 2017 г.