

К. Ю. ВЕРШИННИНА, аспирант, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: vershininaks@gmail.com)

Д. О. ГЛУШКОВ, канд. физ.-мат. наук, инженер-исследователь, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: dmitriyog@tpu.ru)

П. А. СТРИЖАК, д-р физ.-мат. наук, профессор, кафедра автоматизации теплоэнергетических процессов, Энергетический институт, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: pavelspa@tpu.ru)

УДК 536.468

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ УГЛЯ И КАПЕЛЬ СУСПЕНЗИОННОГО ТОПЛИВА ПРИ КОНДУКТИВНОМ НАГРЕВЕ

Для типичного бурого угля выполнено экспериментальное исследование зажигания пыли, частиц и капель суспензионного топлива (смесь угольной пыли и воды) при взаимодействии с нагретой поверхностью. Установлены механизмы протекания процессов и интегральные характеристики при варьировании температуры источника нагрева от 600 до 850 °С с использованием средств высокоскоростной (до 10⁵ кадров в секунду) видеорегистрации и специализированного программного обеспечения. Показана существенно большая длительность (более чем на 20 %) процесса инициирования горения суспензионного топлива по сравнению с углем при идентичных условиях проведения экспериментов. Выявлены достаточные для устойчивого зажигания рассмотренных топлив темпы нагрева. Показано, что их значения существенно меньше традиционно используемых в топочных устройствах. Акцентируется внимание на повышенной пожарной опасности процессов приготовления и транспортировки таких топлив в энергетических блоках, узлах и агрегатах.

Ключевые слова: уголь; суспензионное топливо; разогретая поверхность; условия зажигания; кондуктивный теплоперенос.

DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.21-29

Введение

В настоящее время типичными энергоресурсами [1–4] для тепловых электрических станций (ТЭС) являются твердое (уголь), жидкое (мазут) и газообразное (природный газ) топлива. Однако на большинстве объектов теплоэнергетики в качестве основного вида топлива используется уголь [4–6]. Экспертные оценки [6–9] позволяют прогнозировать сохранение такой тенденции в течение ближайших десятилетий вследствие значительных запасов на планете натурального твердого топлива [9], относительно невысокой стоимости его добычи, а также уменьшения потребления жидкого и газообразного видов топлива для нужд теплоэнергетики в связи с ростом объемов их вовлечения в другие отрасли промышленности [10, 11].

Конструкции большинства современных энергетических котлоагрегатов и вспомогательных систем рассчитаны на сжигание определенного вида

топлива. В процессе эксплуатации такого оборудования возможен переход на непроектное топливо [12–14], например на бурые угли близлежащих месторождений, отличающиеся энергетическими и термохимическими характеристиками. Такие виды углей в отличие от каменных характеризуются большим содержанием летучих легковоспламеняющихся компонентов, что повышает риск возникновения нерегламентированных возгораний [15–18] при относительно невысоких температурах окружающей среды на этапах транспортировки, погрузки, хранения и подготовки топлива к сжиганию. Использование низкосортного топлива ведет к увеличению доли оксидов серы, азота и углерода в уходящих дымовых газах. Это является причиной не только ухудшения условий эксплуатации технологического оборудования в связи с ускоренным шлакованием поверхностей нагрева [19, 20], но и роста концентрации вредных веществ в окружающей среде [21, 22].

Одним из возможных путей утилизации твердых и жидких отходов промышленного производства, снижения пожарной опасности топлива, повышения к. п. д. котлоагрегата, улучшения экологической обстановки в окрестности ТЭС является использование двухкомпонентных топлив — водоугольных суспензий (ВУС) [23–27], состоящих из мелкодисперсных частиц низкосортного угля, а также воды или жидких отходов промышленного производства. В результате исследований [24–26] выявлены основные отличия процессов воспламенения и горения капель ВУС и пылевидного твердого топлива при высокотемпературном (около 1300 °С) нагреве конвективным потоком (в условиях функционирования топочных устройств энергетических котлоагрегатов). Установлено [25, 26], что активизация реакционной поверхности ВУС на стадии воспламенения протекает при меньших значениях температуры источника нагрева, а удельная площадь реакционной поверхности в зоне горения возрастает наряду с интенсификацией процесса за счет реакции взаимодействия углерода с водяным паром. В связи с отмеченными преимуществами перспективных для энергетических котлоагрегатов ВУС представляется целесообразным изучение механизмов и интегральных характеристик процессов инициирования горения капель топлива, а также проведение сравнительного анализа условий, необходимых и достаточных для зажигания твердого и суспензионного топлив при тепловом контакте с источником, нагретым до умеренных (не более 800 °С) температур.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование характеристик зажигания час-

тиц угля и капель суспензионного топлива в условиях кондуктивного нагрева.

Экспериментальный стенд и методы исследований

На рис. 1 приведена схема экспериментального стенда для изучения физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии частиц угля и капель ВУС с разогретой поверхностью. В качестве такой поверхности использовано одно из оснований металлического (сталь 20) цилиндра 7 (см. рис. 1) высотой 50 мм и диаметром 25 мм. Его нагрев осуществлялся при помощи индукционного нагревателя 4 (мощность 15 кВт·А, диапазон частот 30–100 кГц). Цилиндр 7 устанавливался таким образом, что одним из оснований он опирался на керамическую пластину, а к другому была подведена спираль индуктора 5 (внутренний диаметр изгиба 30 мм), изготовленная из медной полый трубки диаметром 8 мм. Прогрев материала цилиндра 7 происходил за счет токов Фуко под действием переменного магнитного поля, индуцируемого спиралью 5. Измерение температуры поверхности нагрева T_p осуществлялось контактным [28] и бесконтактным [29] методами — термоэлектрическим термопреобразователем 8 (тип термопары — хромель-алюмель, диапазон измеряемых температур 0–1100 °С, погрешность измерения $\pm 3,3$ °С) и инфракрасным пирометром 9 (диапазон измеряемых температур 200–1500 °С, погрешность измерения 1 %, разрешение 1 °С, спектральный диапазон 8–14 мкм). Поддержание температуры на заданном уровне обеспечивалось регулятором 10 (диапазон температур 40–2200 °С, разрешение 1 °С). Посредством последнего формировался алгоритм

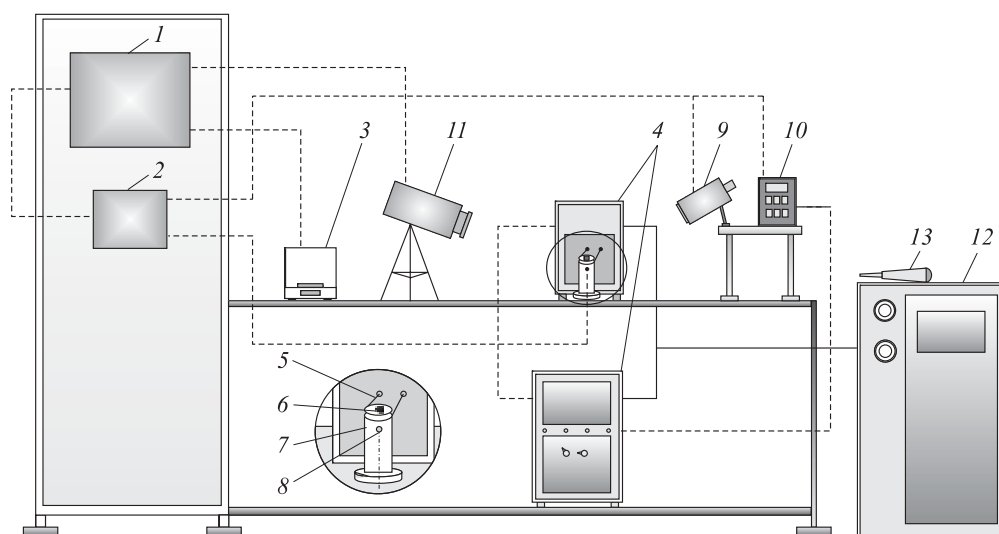


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 — панельный компьютер; 2 — регистратор многоканальный; 3 — аналитические весы; 4 — индукционный нагреватель; 5 — спираль (индуктор); 6 — образец топлива; 7 — стальной цилиндр; 8 — термоэлектрический термопреобразователь; 9 — инфракрасный пирометр; 10 — регулятор температуры; 11 — высокоскоростная видеокамера; 12 — чиллер; 13 — дозатор; — — — — — линии электрической связи; — — — — — линии циркуляции охлаждающей жидкости

соответствующего режима работы индукционного нагревателя 4 согласно методу управления по отклонению регулируемой величины [30] — температуры поверхности нагрева цилиндра 7. Для водяного охлаждения силовых элементов индукционного нагревателя 4 использовался чиллер 12 (хладопроизводительность 2,8 кВт, температура в водяном контуре 5–35 °С).

Видеорегистрация исследуемых процессов инициирования горения частиц угля и капель ВУС выполнялась с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310 11 (максимальная скорость съемки 3260 кадров в секунду при полном разрешении 1280×800 пикселей, размер пикселя 20 мкм, глубина цвета 12 бит, память 16 Гб). Экспериментальные данные (видеограммы, тренды температур) записывались в память панельного компьютера 1 (частота процессора 3,4 ГГц, оперативное запоминающее устройство 8 Гб, постоянное запоминающее устройство 1 Тб) и многоканального регистратора 2 (12 каналов аналогового входа, постоянное запоминающее устройство 2 Гб, диапазон измерений для термоэлектрических термопреобразователей (хромель-алюмель) 50–1300 °С, погрешность измерения ±0,25 %).

В качестве объектов исследования были выбраны три образца топлива на основе бурого угля марки Б2 Бородинского месторождения Красноярского края:

- 1) частицы угля размерами около 1; 3 и 5 мм;
- 2) угольная пыль с размерами частиц около 100 мкм;
- 3) суспензионное топливо на основе угольной пыли (50 %) и воды (50 %) с размером капель около 5 мм.

Характеристики, установленные в результате технического анализа пробы угля, представлены в таблице. При проведении экспериментов масса частиц определялась с использованием аналитических весов 3 (среднеквадратическое отклонение 0,1 г, дискретность 0,0001 г). Средняя масса образцов трех характерных размеров 1; 3 и 5 мм составляла соответственно 20,9; 27,6 и 32,4 мг. Частицы угля имели форму неправильных многогранников, размеры вдоль трех пространственных координат отличались не более чем на 10 %. Масса образцов угольной пыли соответствовала массе частиц угля размерами 1; 3 и 5 мм. Диаметр капель ВУС составлял 5 мм, объем — около 65 мкл.

После стабилизации температуры T_p на заданном уровне исследуемые образцы 6 помещали на поверхность нагрева цилиндра 7. Частицы угля подавали лабораторным пинцетом, угольной пыли — лабораторной мерной ложечкой, капли ВУС — дозатором Finnpiptette Novus 13 (диапазон 10–100 мкл, погреш-

Результаты технического анализа характеристик угля марки Б

Показатель	Значение показателя
Зольность в сухом состоянии A^d , %	4,12
Летучие вещества в сухом состоянии V^{daf} , %	47,63
Высшая теплота сгорания в рабочем состоянии Q_s^r , МДж/кг	22,91

ность 1,5 %, дискретность установки 0,1 мкл). Эксперименты проводили в идентичных и хорошо воспроизводимых условиях при комнатной температуре 22 °С и относительной влажности 65 %. Процессы, протекающие в течение индукционного периода в окрестности образца 6, регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры 11. В результате анализа видеозаписей при помощи программного обеспечения Tema Automotive [31, 32] устанавливались зависимости интегральных характеристик исследуемого процесса для различных топливных композиций от температуры источника энергии. Разброс экспериментальных данных увеличивался с уменьшением температуры поверхности нагрева, поэтому число опытов при фиксированном значении T_p выбиралось с учетом этой особенности: их количество варьировалось от 6 до 10.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований установлены наиболее характерные отличия процессов инициирования горения частиц и пыли бурого угля, а также капель суспензионного топлива на его основе в условиях кондуктивного нагрева.

Видеограммы, представленные на рис. 2, иллюстрируют типичные стадии зажигания частицы угля. Под действием теплоты источника нагрева происходит испарение влаги и термическое разложение органической части топлива. Вследствие диффузии летучих веществ в окружающую среду в окрестности частицы формируется горючая газовая смесь, которая воспламеняется при достижении некоторых предельных температур и концентраций в системе *горючие газы — окислитель*. Экзотермическая реакция окисления летучих сопровождается тепловыделением, что вызывает рост температуры приповерхностного слоя частицы и скорости реакции разложения. Увеличение концентрации летучих в окрестности частицы приводит к расширению фронта пламени и повышению температуры приповерхностного слоя коксового остатка до значений (около 1700 °С), необходимых и достаточных для гетерогенного горения углерода. Анализ видеозаписей позволил установить, что стадия устойчивого зажигания коксового остатка может начинаться еще до

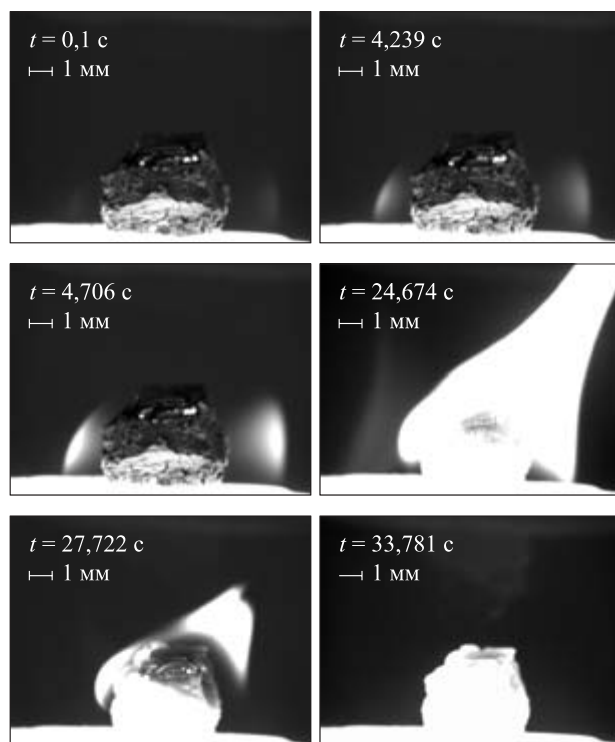


Рис. 2. Типичные видеogramмы зажигания частицы угля размером 5 мм при $T_p \approx 550^\circ\text{C}$

полного выгорания летучих веществ в окрестности частицы угля.

Процесс воспламенения угольной пыли (рис. 3) носит быстротекущий характер. В условиях взаимодействия совокупности мелкодисперсных частиц угля с разогретой поверхностью достаточно сложно выделить отдельные стадии воспламенения (как, например, инертный прогрев и горение летучих), но момент зажигания может быть установлен по появлению на видеозаписи свечения частиц, характерного для протекания экзотермической реакции горения. Время задержки зажигания бурогоугольной пыли в широком диапазоне ($600\text{--}850^\circ\text{C}$) варьирования температуры источника нагрева не превышает 0,05 с.

На рис. 4 представлены типичные видеogramмы процесса зажигания капли ВУС. В результате прогрева образца происходит испарение влаги, сопровождающееся изменением (до 5 %) размера капли. На стадии инертного прогрева инициировалось термическое разложение органической части твердого компонента (угля), входящего в состав ВУС. Выделяющиеся летучие, смешиваясь с воздухом, формируют горючую газовую смесь в окрестности образца. Последующее окисление газообразных продуктов термического разложения в воздухе приводит к интенсификации выгорания углерода. Диспергирование капли ВУС характерно для начального этапа горения летучих. При этом образец сферической формы разрушается. Часть угольной пыли уносится конвек-

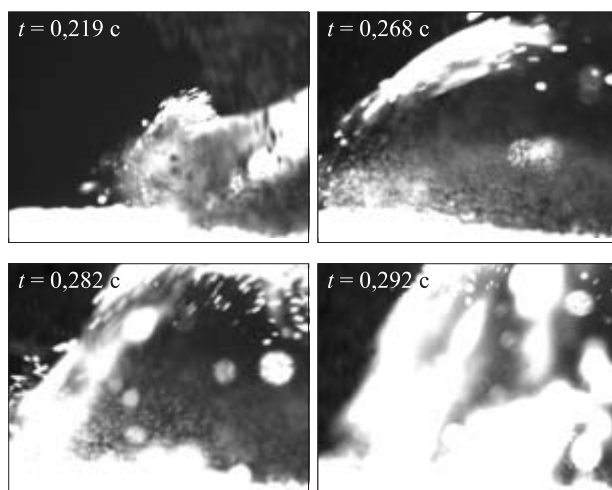


Рис. 3. Типичные видеogramмы зажигания угольной пыли с размером частиц 100 мкм при $T_p \approx 550^\circ\text{C}$

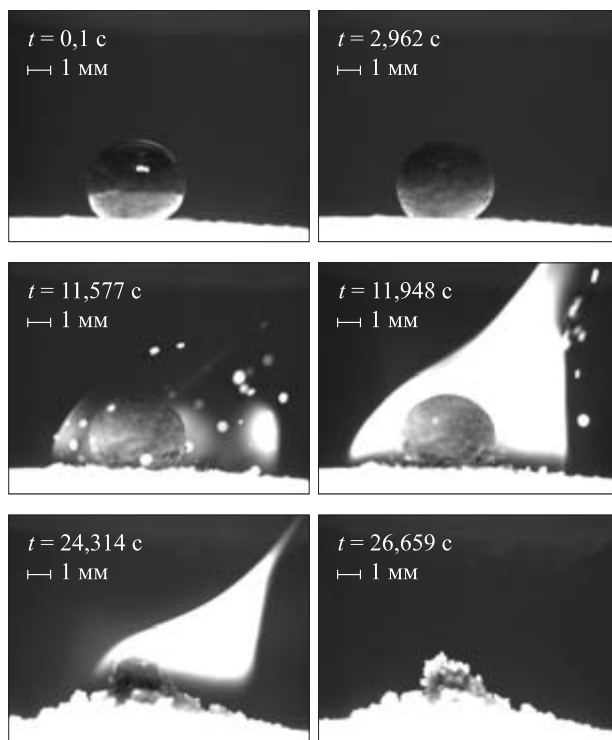


Рис. 4. Типичные видеogramмы зажигания капли суспензионного топлива размером 5 мм при $T_p \approx 550^\circ\text{C}$

тивным газовым потоком, а другая догорает на поверхности разогретой пластины.

Выполненные эксперименты позволили установить зависимость времен задержки зажигания t_d капли ВУС и частиц угольного топлива от температуры нагретой поверхности (рис. 5). Из рисунка видно, что при увеличении размеров угольных частиц требуется более длительный прогрев для инициирования горения. В то же время установленные времена задержки зажигания в диапазоне $t_d < 10$ с иллюстрируют повышенную пожарную опасность возгорания твердых топлив даже в условиях крат-

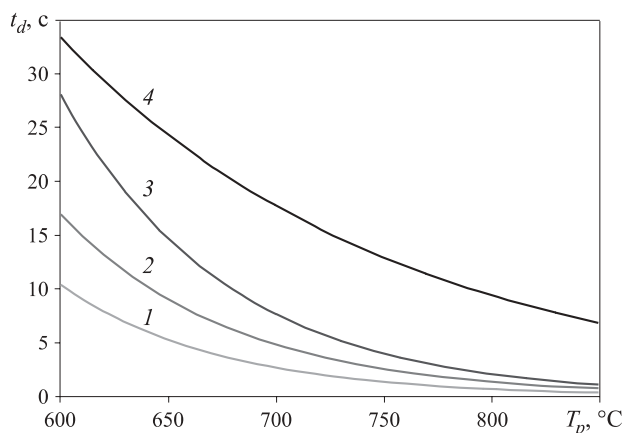


Рис. 5. Времена задержки зажигания частиц угля размером 1 мм (1), 3 мм (2), 5 мм (3) и капле суспензионного топлива размером 5 мм (4) в зависимости от температуры поверхности нагрева

ковременного нагрева, соответствующих типичным стадиям приготовления и подачи топлива. Особенно следует выделить диапазон температур поверхности 750–900 °С, при которых t_d составляет несколько секунд. Эти диапазоны вследствие высокой скорости реализации процессов зажигания соответствуют условиям детонации (взрыва), поэтому они представляют наибольший интерес с точки зрения пожаровзрывобезопасности.

Несмотря на наличие схожих этапов процесса воспламенения (инертный прогрев топлива, испарение влаги, выход летучих веществ и их зажигание, горение углерода), продолжительность аналогичных стадий для частиц твердого органического топлива и капель ВУС может значительно различаться. Установлено, что время инертного прогрева, необходимое для инициирования горения капли ВУС, превышает (более чем на 20 %) аналогичную характеристику для частицы угля при идентичных условиях проведения исследований. Такое существ-

венное отличие обусловлено высоким влагосодержанием ВУС и, следовательно, дополнительными затратами энергии и времени на испарение воды. Эти результаты, несмотря на значительные отклонения t_d , иллюстрируют высокую пожарную опасность отдельных этапов, протекающих при подготовке к сжиганию известных топливных композиций в энергетических блоках.

Заключение

Результаты экспериментов по зажиганию частиц и пыли бурого угля, а также капле суспензионного топлива на его основе при взаимодействии с разогретой пластиной позволили установить существенное влияние размеров частиц на времена задержки их зажигания. Показано, что длительность процесса инициирования горения капли суспензионного топлива существенно выше (более чем на 20 %) по сравнению с частицей угля при идентичных условиях проведения исследований. Выявлены диапазоны температур поверхности (700–850 °С для частиц угля, 800–850 °С для капель ВУС), при которых время реализации исследуемых пожароопасных процессов не превышает нескольких секунд. Полученные результаты можно использовать при прогнозировании предельных условий, характерных для нерегламентированных возгораний на энергетических установках, а также при объяснении причин соответствующих аварий, пожаров и взрывов.

Экспериментальное исследование инициирования горения капель суспензионного топлива выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 15-19-10003). Исследование зажигания частиц угля проведено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-03-31304 мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Олимпиев В. В. Экономия энергетических и финансовых затрат при эксплуатации основных резервуаров мазутных хозяйств ТЭС и котельных // Теплоэнергетика. — 2003. — № 9. — С. 40–45.
- Неуймин В. М. Результаты экономического и энергетического анализа ТЭС с энергоблоками на природном газе // Энергетик. — 2013. — № 7. — С. 2–5.
- Belošević S., Tomanović I., Beljanski V., Tucaković D., Živanović T. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants // Applied Thermal Engineering. — 2015. — Vol. 74. — P. 102–110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.019.
- Алехнович А. Н., Богомолов В. В., Артемьева Н. В. Характеристики новых энергетических углей, сжигаемых на ТЭС России // Энергетик. — 2013. — № 6. — С. 83–87.
- Саламов А. А. О новом поколении пылеугольных ТЭС в теплоэнергетике // Энергетик. — 2007. — № 9. — С. 25–27.
- Саломатов В. В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России (Обзор) // Теплофизика и аэромеханика. — 2009. — Т. 16, № 4. — С. 531–544.
- Саркисян В. А. Уголь и природный газ в энергетике России // Уголь. — 2003. — № 10 (930). — С. 17–19.

8. Снеткова И. М. Некоторые аспекты проблемы соотношений добычи и использования мировых энергетических ресурсов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 1. — С. 147–153.
9. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. — М. : ИНЭИ РАН, 2013. — 108 с.
10. Попов Ю. В., Макаров А. К., Плешакова Н. А., Занозина И. И. Перевод ЭЛОУ-АВТ-6 на переработку высокосернистых нефтей и увеличение производительности установки // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. — 2012. — № 7. — С. 21–23.
11. Иванов С. И., Бусыгин И. Г., Бусыгина Н. В. Перспективные технологии глубокой промышленной переработки природного газа // Газовая промышленность. — 2005. — № 7. — С. 58–60.
12. Захматов В. Д. Угроза государственной программе по энергетической независимости Украины — переводу газовых электростанций на угольную пыль // Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22, № 8. — С. 63–69.
13. Алехнович А. Н., Богомолов В. В. Применение смесей углей на ТЭС для расширения топливной базы и решения вопросов экологии // Электрические станции. — 2010. — № 4. — С. 2–8.
14. Гиль А. В., Старченко А. В., Заворин А. С. Применение численного моделирования топочных процессов для практики перевода котлов на непроектное топливо : монография. — Томск : STT, 2011. — 181 с.
15. Avila C., Wu T., Lester E. Estimating the spontaneous combustion potential of coals using thermogravimetric analysis // Energy and Fuels. — 2014. — Vol. 28, No. 3. — P. 1765–1773. DOI: 10.1021/ef402119f.
16. Портола В. А., Торосян Е. С. Интенсификация процесса самовозгорания угля при перевозке автомобильным транспортом // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 1. — С. 46–49.
17. Амельчугов С. П., Быков В. И., Цыбенова С. Б. Самовозгорание пыли бурого угля. Эксперимент, определение кинетических параметров и численное моделирование // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 3. — С. 48–54.
18. Портола В. А. Опасность самовозгорания угольной пыли // Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 6. — С. 36–39.
19. Финкер Ф. З., Кубышкин И. Б., Митрюхин А. Г., Дульнева Л. Т., Кацман В. М. Об организации работы котлов П-67 на бурых углях Канско-Ачинского бассейна в бесшлаковочном режиме // Энергетик. — 2010. — № 2. — С. 12–15.
20. Бойко Е. А., Жадовец Е. М., Янов С. Р. Анализ тепловой эффективности полурadiaционных и конвективных поверхностей нагрева пылеугольных паровых котлов // Электрические станции. — 2010. — № 10. — С. 41–46.
21. Саламов А. А. Золошлаковые отходы европейских ТЭС // Энергетик. — 2014. — № 10. — С. 35–38.
22. Куликов М. А., Гаврилов Е. И., Демин В. Ф., Захарченко И. Е. Риски воздействия атмосферных выбросов электростанций на здоровье населения // Теплоэнергетика. — 2009. — № 1. — С. 71–76.
23. Горлов Е. Г., Серегин А. И., Ходаков Г. С. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива // Химия твердого топлива. — 2007. — № 6. — С. 51–57.
24. Ходаков Г. С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. — 2007. — № 1. — С. 35–45.
25. Vostrikov A. A., Fedyaeva O. N., Dubov D. Y., Psarov S. A., Sokol M. Y. Conversion of brown coal in supercritical water without and with addition of oxygen at continuous supply of coal-water slurry // Energy. — 2011. — Vol. 36, No. 4. — P. 1948–1955. DOI: 10.1016/j.energy.2010.05.004.
26. Осинцев К. В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов // Теплоэнергетика. — 2012. — № 6. — С. 21–27.
27. Хилько С. Л., Титов Е. В. Способ получения и реологические характеристики суспензионного топлива на основе бурого угля // Химия твердого топлива. — 2001. — № 1. — С. 78–87.
28. Кузнецов Г. В., Мухаммадеев К. М. Численная оценка погрешности измерений температур в условиях локального неидеального контакта спая термопары и материала // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 314, № 4. — С. 12–16.
29. Галанов Е. К., Филатов М. К. Метрологические вопросы измерения температуры поверхностей бесконтактным методом ИК-пирометрии // Оптический журнал. — 2009. — Т. 76, № 3. — С. 44–47.
30. Демидович В. Б., Растворова И. И. Оптимальное управление периодическим индукционным нагревателем немагнитных цилиндрических заготовок // Индукционный нагрев. — 2013. — № 4 (26). — С. 13–15.

31. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion // *Metrology and Measurement Systems*. — 2012. — Vol. 19, No. 4. — P. 797–804. DOI: 10.2478/v10178-012-0071-2.
32. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. — 2015. — Vol. 85. — P. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.078.

Материал поступил в редакцию 23 июля 2015 г.

Для цитирования: Вершинина К. Ю., Глушков Д. О., Стрижак П. А. Характеристики зажигания частиц угля и капель суспензионного топлива при кондуктивном нагреве // *Пожаровзрывобезопасность*. — 2015. — Т. 24, № 10. — С. 21–29. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.21-29.

English

IGNITION CHARACTERISTICS OF COAL PARTICLES AND SLURRY FUEL DROPLETS UNDER CONDUCTIVE HEATING

VERSHININA K. Yu., Postgraduate Student, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: vershininaks@gmail.com)

GLUSHKOV D. O., Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research Engineer, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: dmitriyog@tpu.ru)

STRIZHAK P. A., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Heat and Power Process Automation, Institute of Power Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University (Lenina Avenue, 30, Tomsk, 634050, Russian Federation; e-mail address: pavelspa@tpu.ru)

ABSTRACT

This article presents the experimental investigation results of ignition of particles and dust of lignite coal (B2 rank, Krasnoyarsk region, Borodino deposit) as well as slurry fuel droplets (mixture of coal dust and water) based on this coal at interaction with heated surface. The studies are focused on determining the mechanisms and conditions of ignition of organic fuels (which are used in thermal power plants) at direct contact with heated surface. Conductive heat transfer is typical for actual conditions of technological processes at interaction of fuel particles or droplets with heated surfaces of power equipment at the stages of preparing components, their filtration, drying, transportation and supply to combustion chambers.

For several characteristic sizes (from 1 to 5 mm) of the coal particles we determined the duration of inert heating until the implementation moment of intense exothermic process in the range of heat source temperatures from 600 to 850 °C. Similar results were obtained for slurry fuel droplet with characteristic size of 5 mm. The significant influence of coal particle sizes on their ignition delay times was revealed. Analysis of experimental results showed, that the process duration of ignition initiating for slurry fuel droplet considerably exceeds (more than 20 %) the similar characteristic for coal particle under the identical research conditions.

Keywords: coal; slurry fuel; hot plate; ignition conditions; conductive heat transfer.

REFERENCES

1. Olimp'ev V. V. Saving energy and money when operating the main reservoirs of the fuel-oil facilities at thermal power stations and boiler houses. *Thermal Engineering*, 2003, vol. 50, no. 9, pp. 742–747.
2. Neuymin V. M. Rezultaty ekonomicheskogo i eksergeticheskogo analiza TES s energoblokami na prirodnom gaze [The results of economic and exergetic analysis of thermal power plants with natural gas power units]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2013, no. 7, pp. 2–5.

3. Belošević S., Tomanović I., Beljanski V., Tucaković D., Živanović T. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 74, pp. 102–110. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.019.
4. Alekhovich A. N., Bogomolov V. V., Artemyeva N. V. Kharakteristiki novykh energeticheskikh ugley, szhigayemykh na TES Rossii [Features of new energy coals burning at thermal power stations in Russia]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2013, no. 6, pp. 83–87.
5. Salamov A. A. O novom pokolenii pyleugolnykh TES v teploenergetike [On the new generation of coal-fired thermal power plants in the thermal energy]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2007, no. 9, pp. 25–27.
6. Salomatov V. V. The state and prospects of coal and nuclear power generation in Russia (review). *Thermophysics and Aeromechanics*, 2009, vol. 16, no. 4, pp. 501–513. DOI: 10.1134/s0869864309040015.
7. Sarkisyan V. A. Ugol i prirodnyy gaz v energetike Rossii [Coal and natural gas at energetic of Russia]. *Ugol — Coal*, 2003, no. 10 (930), pp. 17–19.
8. Snetkova I. M. Nekotoryye aspekty problemy sootnosheniya dobychi i ispolzovaniya mirovykh energeticheskikh resursov [Some aspects of a problem of parities of extraction and utilization of world power resources]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten — Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2010, no. 1, pp. 147–153.
9. *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda* [Outlook for energy industry: the world and Russia until 2040]. Moscow, INEI RAN Publ., 2013. 108 p.
10. Popov Yu. V., Makarov A. K., Pleshakova N. A., Zanozina I. I. Perevod ELOU AVT-6 na pererabotku vysokosernistykh neftey i uvelicheniye proizvoditelnosti ustanovki [Transfer of ELOU AVT-6 to processing high-sulfur oils and increase the productivity of the plant]. *Neftepererabotka i neftekhimiya. Nauchno-tehnicheskiye dostizheniya i peredovoy opyt — Refining and Petrochemicals. Scientific and Technical Achievements and Advanced Experience*, 2012, no. 7, pp. 21–23.
11. Ivanov S. I., Busygin I. G., Busygina N. V. Perspektivnyye tekhnologii glubokoy promyslovoy pererabotki prirodnogo gaza [Advanced technologies of deep field processing of natural gas]. *Gazovaya promyshlennost — Gas Industry of Russia*, 2005, no. 7, pp. 58–60.
12. Zakhmatov V. D. Ugroza gosudarstvennoy programme po energeticheskoy nezavisimosti Ukrainy — perevodu gazovykh elektrostantsiy na ugolnuyu pyl [Government program threat on power independence of Ukraine — transfer of gas power stations into coal]. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2013, vol. 22, no. 8, pp. 63–69.
13. Alekhovich A. N., Bogomolov V. V. Use of coal blends at thermal power plants. *Power Technology and Engineering*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 213–219. DOI: 10.1007/s10749-010-0167-3.
14. Gil A. V., Starchenko A. V., Zavorin A. S. *Primeneniye chislennogo modelirovaniya topochnykh protsessov dlya praktiki perevoda kotlov na neproektnoye toplivo: monografiya* [The use of numerical modeling of combustion processes for the practice of transferring boilers to non-project fuels: monograph]. Tomsk, STT Publ., 2011. 181 p.
15. Avila C., Wu T., Lester E. Estimating the spontaneous combustion potential of coals using thermogravimetric analysis. *Energy and Fuels*, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 1765–1773. DOI: 10.1021/ef402119f.
16. Portola V. A., Torosyan E. S. Intensifikatsiya protsessa samovozgoraniya uglya pri perevozke avtomobilnym transportom [Intensification of coal spontaneous combustion process during transportation by motor transport]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Occupational Safety in Industry*, 2015, no. 1, pp. 46–49.
17. Amelchugov S. P., Bykov V. I., Tsybenova S. B. Spontaneous combustion of brown-coal dust. Experiment, determination of kinetic parameters, and numerical modeling. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2002, vol. 38, no. 3, pp. 295–300. DOI: 10.1023/A:1015649702447.
18. Portola V. A. Opasnost samovozgoraniya ugolnoy pyli [Danger of coal dust self-ignition]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti — Occupational Safety in Industry*, 2015, no. 6, pp. 36–39.
19. Finker F. Z., Kubyshekin I. B., Mitryukhin A. G., Dulneva L. T., Katsman V. M. Ob organizatsii raboty kotlov P-67 na burykh uglyakh Kansk-Achinskogo basseyna v besshlakovochnom rezhime [On the operation organization of the boiler P-67 with the brown coal of the Kansk-Achinsk basin in nonslagging mode]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2010, no. 2, pp. 12–15.
20. Boyko E. A., Zhadovets E. M., Yanov S. R. Analiz teplovoy effektivnosti poluradiatsionnykh i konvektivnykh poverkhnostey nagreva pyleugolnykh parovykh kotlov [The analysis of thermal efficiency of semiradiating and convective surfaces of heating of the coal fired steam boilers]. *Elektricheskiye stantsii — Power Technology and Engineering*, 2010, no. 10, pp. 41–46.

21. Salamov A. A. Zoloshlakovyie otkhody yevropeyskikh TES [Ash wastes of European thermal power plants]. *Energetik — Power & Electrical Engineering*, 2014, no. 10, pp. 35–38.
22. Kulikov M. A., Gavrilov E. I., Demin V. F., Zakharchenko I. E. Risks relating to the effect of atmospheric emissions from thermal power stations on health of the population. *Thermal Engineering*, 2009, vol. 56, no. 1, pp. 78–85. DOI: 10.1134/s0040601509010133.
23. Gorlov E. G., Seregin A. I., Khodakov G. S. Conditions of utilization of coal mining and processing sludges as slurry fuel. *Solid Fuel Chemistry*, 2007, vol. 41, no. 6, pp. 364–369. DOI: 10.3103/s0361521907060080.
24. Khodakov G. S. Coal-water suspensions in power engineering. *Thermal Engineering*, 2007, vol. 54, no. 1, pp. 36–47. DOI: 10.1134/s0040601507010077.
25. Vostrikov A. A., Fedyaeva O. N., Dubov D. Y., Psarov S. A., Sokol M. Y. Conversion of brown coal in supercritical water without and with addition of oxygen at continuous supply of coal-water slurry. *Energy*, 2011, vol. 36, no. 4, pp. 1948–1955. DOI: 10.1016/j.energy.2010.05.004.
26. Osintsev K. V. Studying flame combustion of coal-water slurries in the furnaces of power-generating boilers. *Thermal Engineering*, 2012, vol. 59, no. 6, pp. 439–445. DOI: 10.1134/s0040601512060079.
27. Khilko S. L., Titov E. V. A suspension fuel based on brown coal. A method of production and rheological characteristics. *Solid Fuel Chemistry*, 2001, vol. 35, no. 1, pp. 71–79.
28. Kuznetsov G. V., Mukhammadeev K. M. Chislennaya otsenka pogreshnosti izmereniy temperatur v usloviyakh lokalnogo neidealnogo kontakta spaya termopary i materiala [Numerical estimate of temperature measurement error at local imperfect contact of thermocouple and material]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2009, vol. 314, no. 4, pp. 12–16.
29. Galanov E. K., Filatov M. K. Metrological questions of the measurement of surface temperature by a noncontact IR-pyrometry method. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 3, pp. 150–152. DOI: 10.1364/jot.76.000150.
30. Demidovich V. B., Rastvorova I. I. Optimalnoye upravleniye periodicheskim induktsionnym nagreva-
telem nemagnitnykh tsilindricheskikh zagotovok [Optimum control of the stage induction heater of non-
magnetic cylindrical ingots]. *Induktsionnyy nagrev — Induction Heating*, 2013, no. 4 (26), pp. 13–15.
31. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high-speed camera during electro-
magnetic expansion. *Metrology and Measurement Systems*, 2012, vol. 19, no. 4, pp. 797–804. DOI:
10.2478/v10178-012-0071-2.
32. Volkov R. S., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of tem-
perature difference between liquid and gas. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015,
vol. 85, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.01.078.

For citation: Vershinina K. Yu., Glushkov D. O., Strizhak P. A. Kharakteristiki zazhiganiya chastits uglya i kapel suspenzionnogo topliva pri konduktivnom nagreve [Ignition characteristics of coal particles and slurry fuel droplets under conductive heating] *Pozharovzryvbezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2015, vol. 24, no. 10, pp. 21–29. DOI: 10.18322/PVB.2015.24.10.21-29.