

УДК 62.661

Исследование воспламенения механоактивированного пылеугольного топлива в вертикальном трубчатом реакторе*

**Е.Б. Бутаков¹, А.П. Бурдуков¹, А.В. Кузнецов¹, Г.В. Чернова¹,
В.А. Кузнецов^{1,2}**

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

²*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

E-mail: e_butakov@mail.ru

В работе проводятся экспериментальные и численные исследования влияния механоактивационного измельчения углей на время их воспламенения в вертикальном трубчатом реакторе. Эксперименты показали, что уголь, измельченный мельницей-активатором (мельницей дезинтеграторного типа), воспламеняется быстрее благодаря эффекту механоактивации. По результатам численных расчетов процессов воспламенения и горения механоактивированного пылеугольного топлива видно, что использование нестационарных методов моделирования турбулентности и модели выхода летучих веществ с учетом структуры угольного вещества позволяют оценить вклад механоактивационного измельчения в интенсивность выхода летучих веществ.

Ключевые слова: уголь, механоактивация, реакционная способность, самовоспламенение, вертикальный трубчатый реактор.

Введение

Известно, что эффективное применение угольного топлива на теплоэлектростанциях является одной из основных задач развития теплоэнергетики [1]. Низкая эффективность использования угля в значительной степени связана с его небольшой реакционной способностью, увеличение которой может быть достигнуто способом измельчения угля, позволяющим при одних и тех же получаемых размерах частиц измельчения повысить эту способность. В работах [2, 3] было установлено, что при механоактивационном измельчении угольного топлива на вновь образованной поверхности возникают активные центры, способные ускорить протекание физико-химических реакций. Также было обнаружено, что измельчение сопровождается ослаблением молекулярных связей, деструкцией макромолекул с образованием свободных радикалов. Исследования горения механоактивированного угольного топлива на полупромышленных стендах показали существование зависимости между способами измельчения и реакционной способностью угля [4–6]. В ряде работ [7–9] проводились лабораторные исследования с целью изучения и сравнения реакционных свойств механоактивированного угля по отношению

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24007.

к окислителям с помощью методов термогравиметрического анализа (ТГА). Результаты этих исследований качественно указывают на влияние эффекта механоактивации на термическое разложение угольного топлива. Установлена зависимость увеличения реакционной способности данного топлива в процессах термоокислительной деструкции от интенсивности механических воздействий, что связано с процессами преобразования относительно высокомолекулярных составляющих органической массы. Анализируя данные ТГА, полученные для углей различных стадий метаморфизма, следует отметить, что в начальной стадии термического разложения значения энергии активации в ряде случаев у исходного и механоактивированного углей были близки. Существенное изменение энергии активации наблюдается после ~20 % степени термического разложения. С учетом этого оценка влияния эффекта механоактивации углей должна проводиться по результатам реагирования не только в начальной стадии процесса, но и в стадии значительной части выгорания (до 50 %) пылевзвеси.

При использовании методов ТГА для проведения анализа требуется достаточно длительное время, в течение которого возможно изменение термических свойств углей, прошедших механохимическую активацию. В связи с этим авторами была разработана методика и создана экспериментальная установка по определению кинетических характеристик углей микропомола на основе изменения температуры вспышки навески угля, т.е. в начальной стадии воспламенения факела. Попытки изучить процесс воспламенения на экспериментальной установке, представляющей собой проточный реактор малой длины (30 см), в котором фиксировалась только вспышка при наличии воспламенения, не привели к результатам, что было обусловлено значительной неравномерностью нагрева из-за малой длины трубчатого реактора [10]. Влияние эффекта механоактивации на реакционные свойства угольного топлива на сегодняшний день не систематизированы и подробно не изучены несмотря на обилие различных работ и методик по исследованиям процесса воспламенения в вертикальных трубчатых реакторах различных масштабов, где вспышка фиксируется как фотодиодами, так и более современным оборудованием — скоростными камерами [11, 12]. Обычно в таких работах исследуются угли различных бассейнов с разными характеристиками, но необходимые и достоверные исходные данные по моделированию процессов, протекающих при сжигании пылеугольного топлива, прошедшего механоактивационную обработку, отсутствуют.

Численное моделирование топочных устройств является на сегодняшний день одним из важнейших способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и суммарном теплообменах [13, 14]. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в развитии численных экспериментов, и большое разнообразие последних, не изученная до конца структура угля и сложные химические процессы, протекающие при горении угольного топлива, не позволяют создать универсальные модели. В этой связи остаются актуальными поиск математических моделей, для использования которых достаточно существующих экспериментальных данных по углям, и создание на их основе комплексной модели для расчета топочной камеры, позволяющей более точно описать процессы горения пылеугольного топлива в топочно-горелочных устройствах.

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования влияния механоактивации угольного топлива на его воспламенение с дальнейшим проведением анализа оценки энергоэффективности угольной механоактивации и применимости математической модели, основанной на нестационарных методах моделирования турбулентности и модели выхода летучих веществ с учетом структуры угольного вещества.

Экспериментальный стенд и методика

Вертикальный трубчатый реактор (рис. 1) представляет собой вертикальную теплоизолированную стальную трубу длиной 1 м с внутренним диаметром 0,4 м, нагреваемую системой низковольтных трансформаторов. По всей длине камеры сгорания в специальных отверстиях, расположенных с шагом 0,1 м, установлены фотодиоды

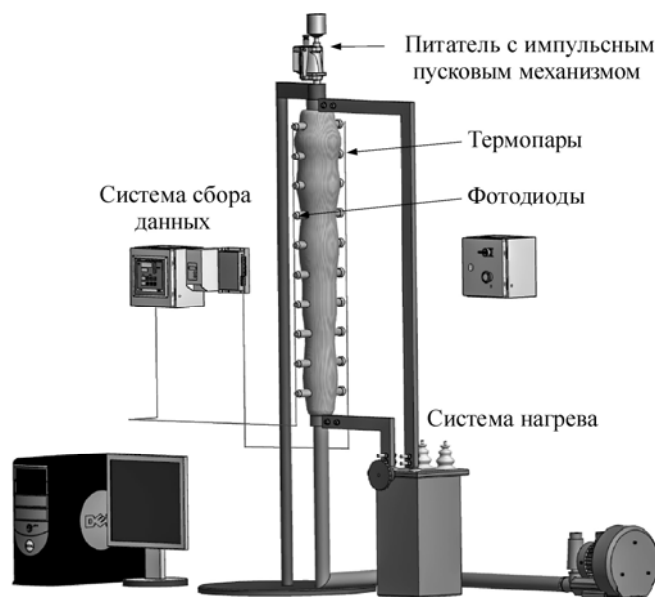


Рис. 1. Вертикальный трубчатый реактор.

и термопары (ТХА), предназначенные для регистрации всплесков и температур соответственно. Для стабилизации температуры на входе в реактор, а также удаления паразитных конвективных потоков и продуктов сгорания в камеру подаётся поток воздуха со скоростью 0–1 м/с.

Пусковой механизм состоит из магнитного клапана и камеры объемом $45 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3$. Над клапаном находится питатель пыли, в который засыпаются образцы массой от 0,1 до 1 г, после чего в камеру закачивается воздух и производится впрыск угольной пыли в реактор. Максимальная температура, которую можно получить с использованием имеющихся трансформаторов, составляет 1000°C . Поступление пыли в камеру сгорания регистрируется микрофоном, подключенным к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) Lcard EP 14-440. Система контроля воспламенения состоит из фотодатчиков, схемы возбуждения, схемы обработки сигналов и блока сбора данных и программного обеспечения для обработки сигналов на персональном компьютере (ПК). На рис. 2 показаны структура и основные компоненты системы. Детектор пламени имеет фотодиод с линзой, фокусирующей свет пламени на своем окне, покрывающей спектральную полосу между 400 и 1100 нм.

Термопары подключены к модулю аналогового ввода данных МВА8, который в свою очередь подключен к компьютеру. Фотодиоды через усилитель подключены к АЦП Lcard EP 14-440, который подсоединён к компьютеру для записи полученных данных по времени с использованием программы Lgraph. Данная методика позволяет определить минимальную температуру воспламенения угольной пыли, а также время воспламенения пыли в зависимости от температуры реактора.

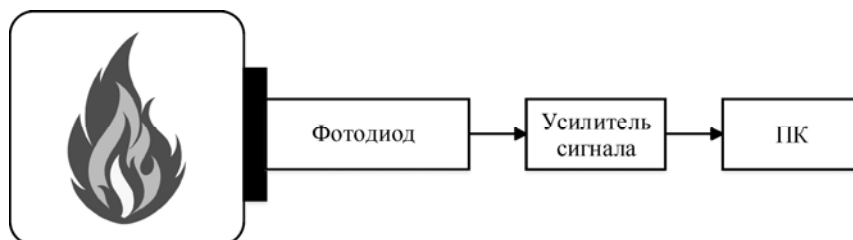


Рис. 2. Блок-схема системы контроля воспламенения.

Таблица
Технические характеристики исходного угля

Характеристики угля	Б	Э	К
Массовая доля влаги на рабочее состояние W^r , %	30,8	7	19
Зольность топлива на рабочую массу A^r , %	11,1	48	7
Выход летучих веществ на сухое беззольное состояние V^{daf} , %	46	24	30
Теплота сгорания на рабочее состояние Q_p^r , МДж/кг	15,3	15,9	21,8

В настоящей работе использовались угли различной степени метаморфизма — бурый (Б), экибастузский (Э), каменный (К), — полученные с теплоэлектростанций и месторождений Сибири. Технические характеристики углей представлены в таблице.

В эксперименте исследовалась минимальная температура воспламенения — граничная температура реактора, при которой оно возможно. Минимальная температура воспламенения является важным параметром, который указывает на необходимое количество энергии для его возникновения и дальнейшего горения угля. Для измерения минимальной температуры воспламенения температура в реакторе последовательно уменьшалась на 10 °С до нахождения её граничной величины, ниже которой воспламенения пылеугольной навески не происходит. Температура воспламенения существенно зависит от степени метаморфизма используемого угля.

Для определения влияния способа измельчения угольного топлива на реакционную способность проводились измерения времени задержки воспламенения, которое используется для определения кинетических констант процесса воспламенения угольной пыли. На рис. 3 показан пример данных, полученных с фотодиода. Линия t_m соответствует прохождению пылеугольных частиц через микрофон, установленный на входе в трубчатый реактор. Перед воспламенением на фотодиодном датчике происходит падение напряжения, что связано с затемнением наблюдаемой области угольной пылью. Время

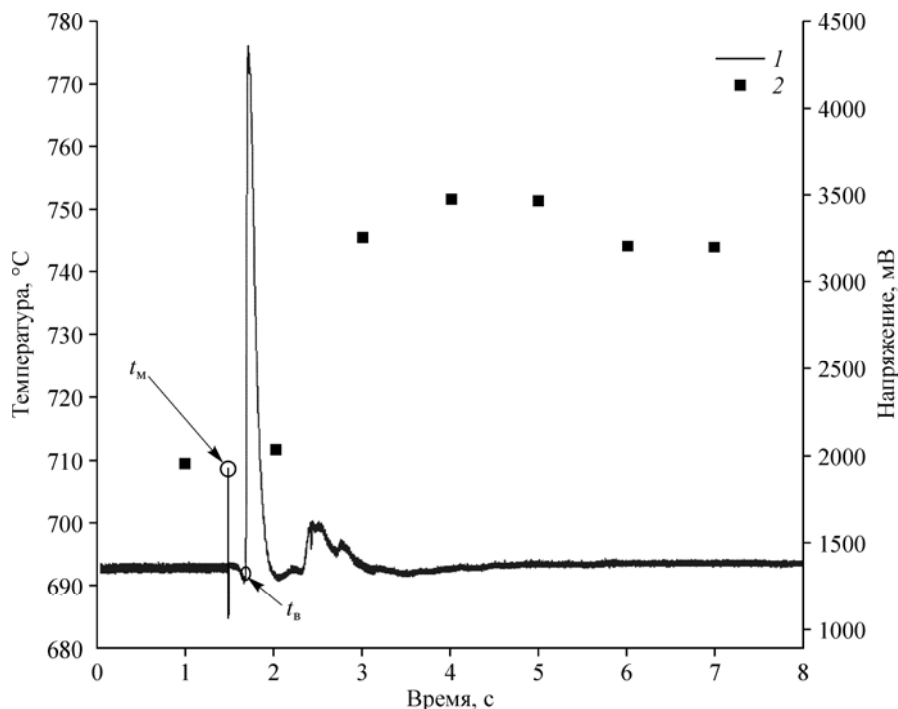


Рис. 3. Динамика изменений температуры в реакторе (1) и показаний напряжения на фотодиоде (2).

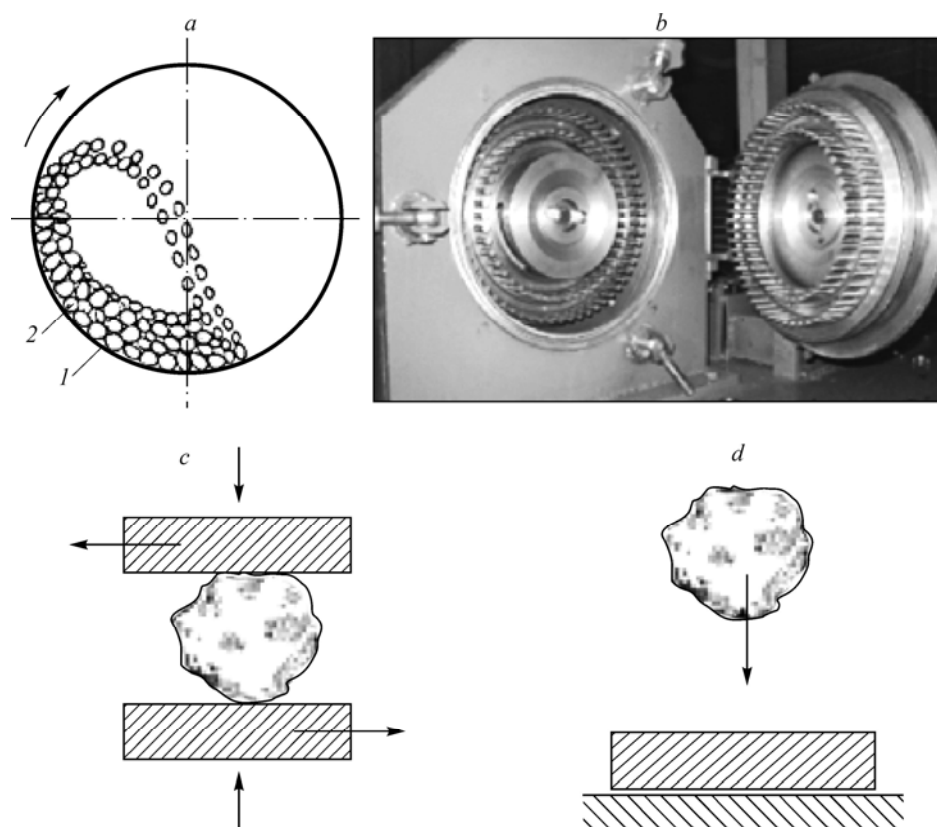


Рис. 4. Мельницы для измельчения угля.

a — шаробарабанная мельница: 1 — барабан, 2 — мелющие тела; *b* — мельница дезинтеграторного типа производительностью 150 кг/ч; *c* — истирание и стесненный удар; *d* — свободный удар.

задержки воспламенения t_3 определяется как время от момента входа частиц в реактор до обнаружения видимого пламени:

$$t_3 = t_m - t_b,$$

где t_m — время впрыска топлива в реактор, регистрируемое микрофоном, t_b — время воспламенения угольной пыли.

В экспериментах использовались шаровая барабанная мельница (ШБМ) (рис. 4а) и мельница дезинтеграторного типа (рис. 4б). После измельчения угли просеивались через сито с ячейками размером 100 мкм. С целью удаления внешней влаги, которая может в значительной степени повлиять на результаты эксперимента, перед измельчением уголь предварительно подсушивался в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 4 ч. Ранее была выполнена серия экспериментов [10] с целью получения оценки влияния количества угольной пыли ($1 \cdot 10^{-4}$, $3 \cdot 10^{-4}$ и $5 \cdot 10^{-4}$ кг), загружаемой в камеру при постоянном количестве воздуха. При увеличении навески до $3 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-4}$ кг разброс результатов становился незначительным (до 5 %), поэтому в дальнейших исследованиях масса навески выбиралась равной $5 \cdot 10^{-4}$ кг.

Расчетная модель

Очевидно, что численное решение рассматриваемой задачи возможно только с применением нестационарных методов моделирования. Расчеты времени воспламенения угольной пыли в вертикальном трубчатом реакторе проводились с использованием URANS $k-\omega$ SST (Unsteady Reynolds Averaged Navier–Stokes) и LES (Large Eddy Simulation) методов

моделирования. Авторами рассматривается турбулентное течение несжимаемого газа. Для моделирования граничных условий на стенках использовался метод пристеночных функций. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1-аппроксимации метода сферических гармоник для серой двухфазной двухтемпературной среды. Коэффициенты поглощения газа вычисляются по модели суммы серых газов, коэффициенты поглощения и рассеяния частицами определяются по аппроксимации оптически крупных частиц. В настоящем исследовании для описания процессов движения частицы применяется метод Лагранжа. Турбулентность потока при движении частицы учитывается путем введения случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения частиц. Расчет химической кинетики горения газового топлива основан на использовании глобальных необратимых реакций между горючими и окислителем. Скорость горения реагентов, в том числе и летучих, определяется с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Данная модель представляет комбинацию кинетической модели горения газовых компонент с моделью «обрыва вихря» (eddy break-up model). Процесс горения угольной частицы представляется в виде следующих последовательных этапов: испарение влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка. Выход летучих веществ описывается моделью CPD (Chemical Percolation Devolatilization) [15], в основе которой лежат физические и химические изменения структуры угля, прошедшие механоактивацию. Скорость горения коксового остатка рассчитывается согласно положениям классической диффузионно-кинетической теории.

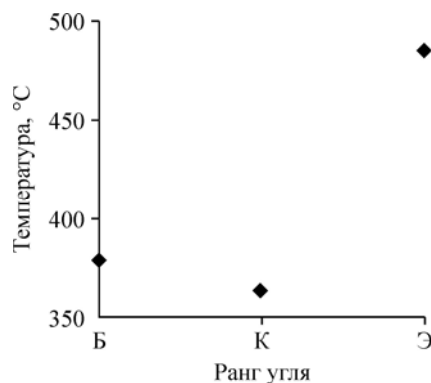
Воспламенение угольного топлива в начальный момент времени протекает в газовой фазе (происходит возгорание летучих компонентов угля), поэтому при численном исследовании времени воспламенения угольной пыли важную роль играет модель выхода летучих веществ. В выбранной CPD-модели органическая масса угля представляется в виде соединённых «мостиками» фрагментов разной степени ароматизированности, которые представляют собой алифатические цепи, эфирные и тиоэфирные связи или их комбинации. При таком подходе выделяется так называемая подвижная фаза, в которой под действием температуры происходит разрушение «мостиков», часть фрагментов отщепляется от ядерной части и в виде низкомолекулярных паро- и газообразных соединений переходит в летучие вещества. Другая часть фрагментов, имеющих более тяжелый молекулярный вес, переходит в плавкое состояние (смолистые вещества), рекомбинирует, при этом частично образуются летучие вещества, а частично с ядерной частью образуется коксовый остаток. Для определения необходимых параметров структуры угольного вещества (общего количества алифатических цепей, эфирных и тиоэфирных связей в органической массе угольного вещества, доли алифатических цепей в подвижной фазе, координационного числа молекулы органического вещества, молекулярного веса ядерной части) с целью их использования в расчетных исследованиях применялись хорошо зарекомендовавшие себя корреляции на основе состава угля, предложенные в работе [16]. Задача решалась с помощью программного пакета Ansys Fluent. Расчетная сетка состояла из 750000 ячеек со сгущением в области подачи угольной пыли. Величина временного шага выбиралась из условия $CFL < 2$.

Результаты

При увеличении содержания летучих веществ в угле температура воспламенения угля уменьшается (рис. 5). Как можно видеть, температура воспламенения бурых и каменных углей существенно ниже по сравнению с экибастузким, поскольку у них наблюдается высокое содержание летучих. Однако содержание летучих компонент в угле не является единственным определяющим фактором, который влияет на температуру воспламенения. Температура воспламенения также зависит от влажности, зольности, степени метаморфизма угля и др.

Рис. 5. Минимальная температура воспламенения углей различной степени метаморфизма.

Символы — экспериментальные данные.



При проведении численных исследований момент воспламенения исследуемого образца определялся путем отслеживания максимальной температуры в объеме вертикального трубчатого реактора. На рис. 6 представлено сравнение результатов расчета воспламенения экибастузского угля после использования ШБМ при максимальной температуре в камере 706–710 °С, полученных разными методами моделирования турбулентности. В целом момент воспламенения, рассчитанный с помощью рассматриваемых методов, совпадает и составляет 0,3 с. Однако на рисунке видно, что кривая изменения температуры, полученная с использованием метода LES, имеет скачкообразные колебания. По мнению авторов это связано с тем, что данный метод более качественно описывает пульсационные характеристики потока, которые влияют на перемешивание горючего газа и окислителя и, в конечном итоге, на скорость воспламенения. Эксперименты проводились в трех различных режимах с выборкой из десяти опытов для каждой фиксированной температуры. На рис. 7 представлено распределение температуры воспламенения экибастузского угля по высоте в вертикальном трубчатом реакторе. Выбор температуры был основан на 100-процентной воспламеняемости топлива с учетом предварительно проведенных исследований. Распределение температуры по высоте имеет достаточно равномерный вид, разница между краями (концами) реактора не превышает 50 °С. После каждого эксперимента проводилась продувка реактора воздухом и регулировка температуры в реакторе.

На рис. 8 и 9 представлены времена от начала ввода частиц в камеру до момента их воспламенения, полученные экспериментально и численно для частиц бурого и экибастузского угля для двух типов мельниц. Можно видеть, что время воспламенения угольной пыли после измельчения в мельнице дезинтеграторного типа меньше, чем после

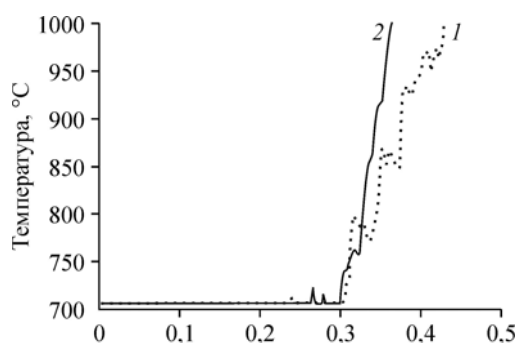


Рис. 6. Расчетная модель динамики изменения максимальной температуры воспламенения экибастузского угля в реакторе.

Расчеты по методам LES (1) и URANS (2).

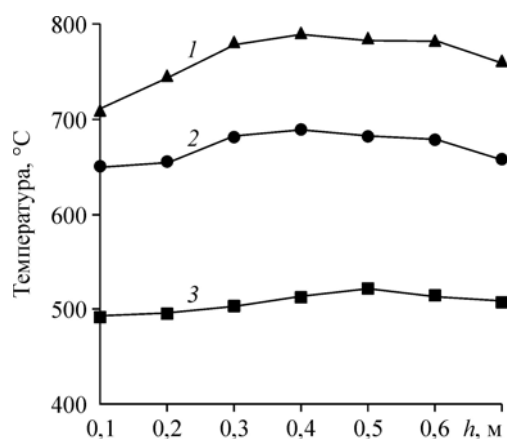


Рис. 7. Распределение температуры воспламенения экибастузского угля по высоте вертикального трубчатого реактора.

1–3 — режимы 1–3 соответственно.

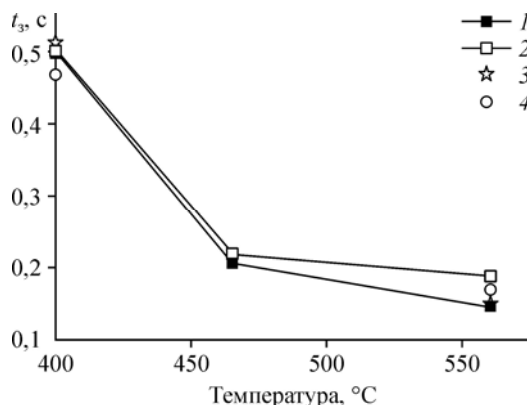


Рис. 8. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) времена задержки воспламенения для бурого угля, измельченного на мельницах дезинтеграторного типа (1, 3) и ШБМ (2, 4).

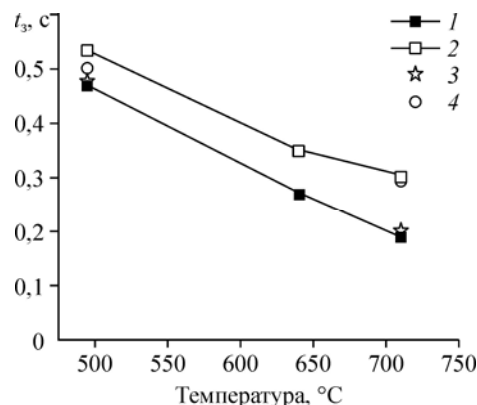


Рис. 9. Экспериментальные (1, 2) и расчетные (3, 4) времена задержки воспламенения для экибастузского угля, измельченного на мельницах дезинтеграторного типа (1, 3) и ШБМ (2, 4).

измельчения в ШБМ как по результатам расчета, так и эксперимента. Численные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными для различных методов измельчения угольного топлива.

Заключение

В результате проведенных экспериментальных и численных исследований удалось установить влияние механоактивации угольного топлива на воспламенение. Показано, что исследуемые угли, измельченные на мельнице дезинтеграторного типа, воспламеняются раньше по сравнению с углями, измельченными в мельнице ШБМ, что свидетельствует о влиянии эффекта механоактивации на реакционные характеристики угольного топлива.

Проведена верификация численной модели и получены результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Показано, что нестационарные методы моделирования турбулентности (URANS, LES) и сложные модели выхода летучих веществ (CPD), применяемые при моделировании воспламенения и горения пылевидного угля в потоке, являются адекватным инструментом для научных исследований, позволяющим корректно описать сложную структуру потока и выявлять непростые физико-химические зависимости.

Список литературы

1. Тугов А.Н., Майданик М.Н. Угольная электрогенерация в России: состояние и перспективы // Тр. II междунар. научно-технич. конф. «Перспективы развития новых технологий в энергетике России» 26–27 октября 2017, ОАО «ВТИ», Москва.
2. Burdukov A.P., Butakov E.B., Popov V.I., Chernetskiy M.Yu., Chernetskaya N.S. The use of mechanically activated micronized coal in thermal power engineering // Thermal Sci. 2016. Vol. 20. P. 23–33.
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. Vol. 122. P. 103–111.
4. Burdukov A.P., Popov V.I., Chernetskiy M.Yu., Dekterev A.A., Hanjalić K. Mechanical activation of micronized coal: prospects for new combustion applications // Applied Thermal Engng. 2015. Vol. 74. P. 174–181.
5. 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. P. 443–458.
6. Welham N.J., Berbennib V., Chapman P.G. Increased chemisorption onto activated carbon after ball-milling // Carbon. 2002. Vol. 40. P. 2307–2315.
7. Хренкова Т.М. Механохимическая активация углей // Недр. 1993. 176 с.

8. Tianyang C., Hongjian Z., Yong Y., Hongliang Z., Hang Z. Investigations into the ignition behaviors of pulverized coals and coal blends in a drop tube furnace using flame monitoring techniques // Fuel. 2010. Vol. 89. P. 743–751.
9. Бурдуков А.П., Бутаков Е.Б., Чернецкий М.Ю., Чернова Г.В. Исследование химической активности механоактивированных твердых топлив и разработка технологии их сжигания // Матер. II междунар. научно-технич. конф. «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии». 2014. С. 281–290.
10. 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.
11. Spalart P.R., Jou W.H., Strelets M., Allmaras S.R. Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid, RANS/LES approach // Advances in DNS/LES: Proceedings of 1st AFOSR Intern. Conf. on DNS/LES. 1997. P. 137–147.
12. Chi T., Zhang H., Yan Y., Zhou H., Zheng H. Investigations into the ignition behaviors of pulverized coals and coal blends in a drop tube furnace using flame monitoring techniques // Fuel. 2010. Vol. 89. P. 743–751.
13. Girolamo A., Lameu N.K., Zhang L., Ninomiya Y. Ignitability and combustibility of Yallourn pyrolysis char under simulated blast furnace conditions // Fuel Processing Technology. 2017. Vol. 156. P. 113–123.
14. Чернецкий М.Ю., Дектерёв А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 3. С. 37–46.
15. Fletcher T.H., Solum M.S., Grant D.M., Critchfield S., Pugmire R.J. Structural evolution of matched tar-char pairs in rapid pyrolysis experiments // Fuel. 1991. Vol. 70. P. 414–423.
16. Genetti D., Fletcher T.H., Predicting C. NMR measurements of chemical structure based on the elemental composition and volatile matter content of coal // American Chemical Society Division of Fuel Chemistry. 1997. Vol. 42. P. 194–198.

*Статья поступила в редакцию 23 января 2019 г.,
после переработки — 15 августа 2019 г.,
принята к публикации 6 ноября 2019 г.*