

УДК 662.71

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЯ И ДРЕВЕСИНЫ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2024 г. А. Д. Мисюкова<sup>1,2,\*</sup>, С. А. Янковский<sup>1,2,\*\*</sup>, А. К. Берикболов<sup>1,\*\*\*</sup>,  
Н. С. Янковская<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО НИ ТПУ Инженерная школа энергетики, Томск, 634050 Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, 650000 Россия

\*e-mail: adm14@tpu.ru

\*\*e-mail: jankovsky@tpu.ru

\*\*\*e-mail: akb10@tpu.ru

\*\*\*\*e-mail: nsy4@tpu.ru

Поступила в редакцию 01.09.2023 г.

После доработки 27.09.2023 г.

Принята к публикации 04.10.2023 г.

Исследованы процессы зажигания смесевых топлив, сформированных на основе угля марки ЗБ месторождения Майкубен, и мелкодисперсных отходов лесопиления и деревообработки. Выполнен анализ процессов воспламенения и горения топливных смесей при различной организации процессов горения. Установлено, что концентрация древесной составляющей оказывает существенное влияние на процессы начала окисления и горения смесевых топлив. При увеличении доли древесной составляющей в смеси до 50% время задержки зажигания снижается в среднем на 18% во всех случаях выполняемых исследований.

Ключевые слова: уголь, древесина, биомасса, отходы лесопиления, зажигание, смесевые топлива

DOI: 10.31857/S0023117724010071 EDN: OPRMCG

### ВВЕДЕНИЕ

Производство тепла и электрической энергии с применением угля будет занимать лидирующие позиции еще на протяжении нескольких десятков лет, несмотря на попытки его замены альтернативными видами топлив, ввиду его огромных мировых запасов и достаточной дешевизны [1–3]. По состоянию на 2023 год уголь – основной вид топлива для производства электроэнергии в мире, его доля составляет более 60% по сравнению с остальными традиционными топливами. Согласно статистическим исследованиям [4], такая тенденция продержится минимум до 2035 г. Существенным недостатком электростанций, работающих на твердом топливе, являются высокие показатели выбросов аэрозольных частиц. Согласно исследованию [6], постоянное вдыхание веществ, образующихся при сгорании угля, вызывает многие заболевания, в частности, респираторные и сердечно-сосудистые, нейродегенерацию [1].

Поиск недорогих, но эффективных способов снижения выбросов антропогенных газов ТЭС в окружающую среду – одна из главных задач не только энергетиков, но и ученых. Один из наиболее перспективных вариантов решения по снижению выбросов в окружающую среду ТЭС – сжигание угля на тепловых электрических станциях совместно с биомассой.

Перспективность использования биомассы объясняется тем, что такое топливо является возобновляемым и экологичным, занимающим четвертое место в энергетическом балансе, уступая углю, отходам нефтепереработки и природному газу. Выбросы углекислого газа при сжигании древесной биомассы считаются нулевыми, так как древесина при горении выделяет такое же количество углекислого газа, какое поглотила в процессе роста. Применение в энергетике топливных смесей, сформированных из угля и древесной биомассы, позволит, не существенно снижая энергетические характеристики топлива (не более чем на 9%), существенно улучшить экологические

показатели установок, работающих на данном топливе, по выбросам антропогенных газов в окружающую среду до 90% по отношению к выбросам угольных энергетических установок [7, 8].

Авторами [9] сравнивалось воздействие токсичности угля и сосновых пеллет при их совместном сжигании на экологию и здоровье людей. Результаты их исследований показали, что совместное сжигание угля и пеллет приводит к снижению экотоксичности и токсичности окружающей среды для человека. Однако использование биомассы для производства энергии также имеет некоторые аспекты, в частности, связанные с проблемами охраны труда и техники безопасности, которые, в свою очередь, связаны с хранением, обращением и переработкой биомассы [10].

Для решения вопроса безопасности и технологичности процессов сжигания смесевых топлив, основанных на древесной биомассе и угле, необходимо исследовать технологии сжигания таких топлив и характеристики их воспламенения при разных способах организации процесса горения.

Топливо из биомассы, как правило, имеет более низкую плотность и более высокое содержание летучих частиц, и потому его характеристики воспламенения и горения существенно отличаются от характеристик воспламенения угля. Время задержки воспламенения и температура воспламенения являются важными показателями для инициализации процессов горения. Расчет этих показателей важен для понимания химической кинетики начала процесса воспламенения, которая играет решающую роль в горении, оказывая значительное влияние на работу котла, энергоэффективность и выбросы загрязняющих веществ.

В работе [20] рассматривалось сжигание смесевых топлив на основе угля и биомассы в слое. Эксперименты показали, что увеличение доли древесной составляющей в смеси приводит к снижению времени задержки зажигания смесевых топлив и концентрации антропогенных газов в процессе сжигания. В работе [11] представлены результаты исследований процессов термического разложения угля марки Д и древесины. По результатам исследований установлено, что совместное термическое разложение смесевых топлив способствует снижению концентрации оксидов серы в газообразных продуктах их термического разложения.

Исследования воспламенения и горения одиночных частиц угля проводятся для оценки воспламенения и горения твердого топлива в различных средах [12]. Авторами [8, 13] исследовалось воспламенение пылевидных частиц угля разных сортов. В ходе исследований авторами установлено, что режим горения (гомогенный или гетерогенный) сильно зависел как от сорта угля, так и от среды, в которой происходит сгорание. Также в работе [14] установлено, что в присутствии  $\text{CO}_2$  подавляется горение летучих веществ, процесс горения протекает гомогенно.

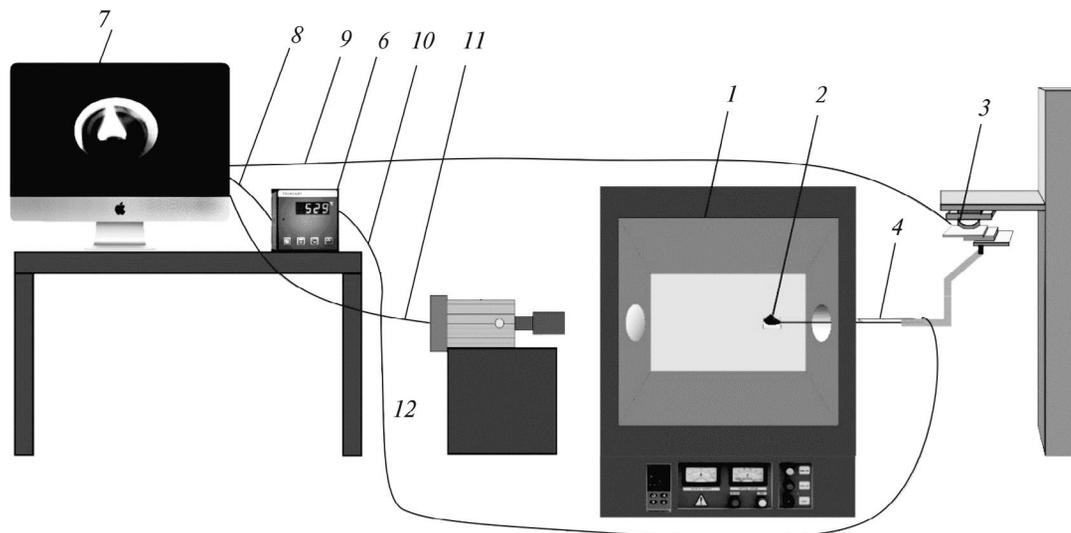
В статье [8] были проведены экспериментальные исследования поведения отдельных частиц угля при их воспламенении в зависимости от их формы и размеров. Они установили, что уголь с частицами разных форм и разных размеров проявляет разные характеристики горения. Особенно важную роль играет размер частиц — для крупных частиц угля горение летучих и полукокса происходит последовательно, а для мелких — одновременно.

Экспериментальные исследования по изучению горения угля и биомассы в условиях, максимально приближенных к реальным камерам сгорания пылеугольных котлоагрегатов, проводились в работах [8, 15, 16].

В работе [7] исследовались стадии процессов горения одиночной частицы угля в поле потока горячего газа. Было установлено, что на скорость воспламенения летучих оказывает сильное влияние концентрация кислорода. Результаты, полученные в ходе исследований, позволяют улучшить понимание стадий горения отдельных частиц угля.

Горение отдельных частиц биомассы имеет практическое ограничение при воспламенении в печи, работающей на пылевидном топливе [17]. Однако в работе [18] рассматривалось влияние формы частиц, их размер, температуры газа и концентрации кислорода с целью изучения и моделирования процессов горения.

Для исследования процессов воспламенения частиц угля и биомассы в потоке воздуха авторами [19] была разработана экспериментальная установка с использованием газовой горелки и регуляторами массовых расходов для контроля температуры и концентрации кислорода в вертикальном трубчатом реакторе. В реактор помещали отдельные частицы угля и биомассы для



**Рис. 1.** Экспериментальный стенд для исследования воспламенения и горения смесевых топлив при термическом нагреве в слое: 1 – терморегулируемая муфельная печь; 2 – смесевое топливо массой 1 г; 3 – координатное устройство с приводом; 4 – платинородиевая термопара; 5 – высокоскоростная видеокамера; 6 – преобразователь сигнала Термодат; 7 – персональный компьютер; 8, 9, 10, 11, 12 – каналы связи между оборудованием [21].

наблюдения за процессом их воспламенения, дегазации и выгорания полукокса. Экспериментально установлено влияние концентрации кислорода на время выгорания полукокса.

Несмотря на достаточно обширные исследования в данном направлении, установлено отсутствие экспериментального обоснования влияния частиц различной формы и размера биомассы и угля (расположенных на некотором расстоянии друг от друга) на процессы их совместного воспламенения и горения. Для выполнения исследований процессов воспламенения и горения смесевых топлив, сформированных на основе угля и биомассы, необходим комплексный подход. Анализ слоевого сжигания смесей позволяет оценить времена задержки зажигания при разных концентрациях древесной составляющей в смеси. Анализ процессов воспламенения и горения отдельных частиц угля и древесины на различном расстоянии друг от друга позволит оценить степень влияния древесных частиц на интенсификацию процессов воспламенения частиц угля и обосновать минимальное расстояние, при котором это взаимодействие возможно. Эксперименты по сжиганию смесевых топлив в потоке позволят подтвердить результаты исследований, выполненных для отдельных частиц.

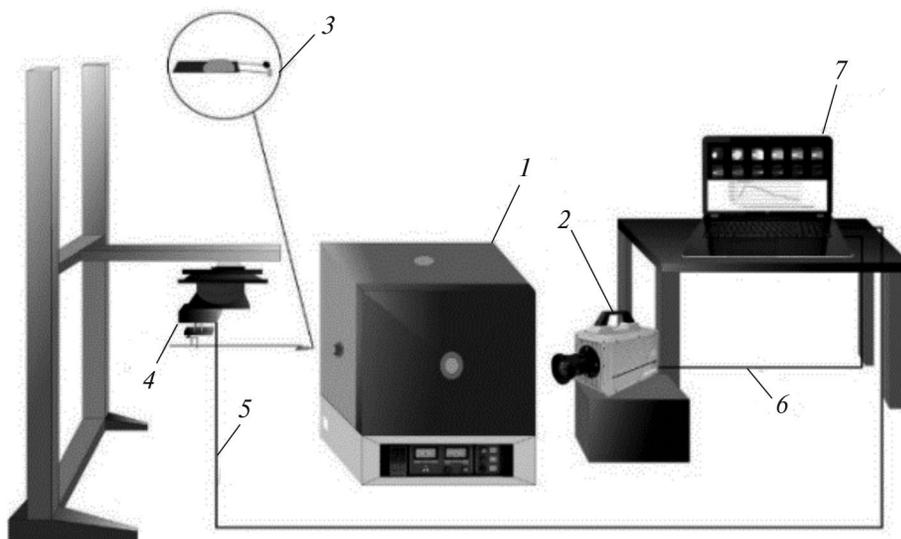
Результаты, представленные в данной работе, позволяют подтвердить возможность сжи-

гания угля совместно с древесной биомассой без существенных энергетических потерь и изменений конструктивных особенностей энергетического оборудования. Сжигание угля совместно с древесной биомассой позволяет снизить температуру прогрева котлов при их розжиге, повысив тем самым эффективность энергетического оборудования. Частичная замена угля отходами лесопиления привозного энергетического угля в регионах с отсутствием угольных месторождений, но с присутствием достаточного количества лесоперерабатывающих предприятий позволит существенно снизить затраты на привозное топливо, что положительно для конечного потребителя энергетических ресурсов.

## МЕТОДЫ

Подробная методика приготовления смесевых топлив описана в работах [11, 20].

Для исследования процессов воспламенения и горения древесно-угольных смесей в слое в качестве исходной компоненты был использован бурый уголь месторождения Майкубен Республики Казахстан. Уголь измельчался механическим способом, с помощью мельницы *Stegler-1000*, после чего просеивался через сито с размером ячеек 500 мкм. В качестве аналитической пробы был отобран остаток на сите с размером ячеек 200 мкм.



**Рис. 2.** Принципиальная схема экспериментальной установки по исследованию процессов воспламенения частицы биомассы и частицы угля, расположенных на некотором расстоянии одна от другой (1; 2 и 3 мм): 1 — печь с регулируемой температурой, 2 — высокоскоростная камера, 3 — держатель с иголками для крепления частицы биомассы и частицы угля, 4 — координатный механизм, 5 — канал связи координатного механизма с ноутбуком, 6 — канал связи камеры с ноутбуком, 7 — ноутбук.

Отходы деревообработки и лесопиления в первую очередь очищались от крупных включений, после чего аналогично углю измельчались в ножевой мельнице и просеивались через сито с размером ячеек 500 мкм, также для исследований отбирался остаток на сите с размером ячеек 200 мкм.

Уголь и отходы деревопереработки смешивались в различных массовых концентрациях, %: 90/10, 75/25, 50/50. Смешение осуществлялось в течение 7–10 мин с применением барабанно-шаровой мельницы с добавлением мелющих тел, равных по массе смеси.

В первой части исследования проводились эксперименты по исследованию времен задержки зажигания навесок смесевых топлив при их термическом нагреве в муфельной печи ПМ-1400. Схема экспериментального стенда приведена на рис. 1. Выполняемые исследования направлены на моделирование процесса слоевого сжигания смесевых топлив и установление степени влияния частиц древесины при термическом разложении на процессы воспламенения частиц угля, расположенных на минимальном расстоянии друг от друга в плотном слое.

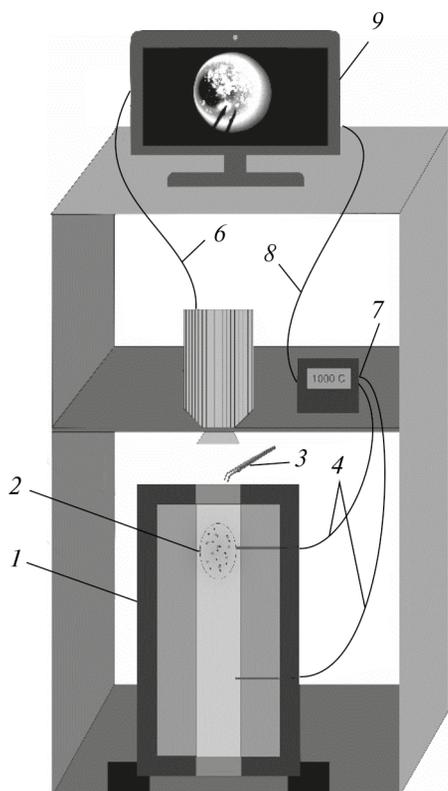
Экспериментальные исследования выполнялись по следующей методике. Навеска с топливом массой 1 г (2) помещалась на горизонтальный держатель координатного механизма (3).

При поступлении сигнала с персонального компьютера (7) координатный механизм приводился в действие и держатель вводился в отверстие муфельной печи (1). Фиксация начала процесса воспламенения и времени задержки зажигания осуществлялась при помощи высокоскоростной видеокамеры *Photron* (5). Временем задержки зажигания считалась разница между попаданием держателя с топливом в объектив видеокамеры и моментом начала свечения топливных частиц.

Во второй части исследования выполнялись работы по установлению взаимного влияния единичной частицы древесины на частицу угля, равных по массе при изменении расстояния 1, 2, 3 мм друг от друга, и экспериментального установления максимального расстояния между частицами, при котором происходит взаимное влияние на процессы воспламенения и горения топливных частиц.

Предварительно была отобрана аналитическая проба угля (остаток на сите 1000 мкм). Далее были отсортированы единичные частицы, равные по массе (среднее значение частицы угля составляло 0.0018 мг).

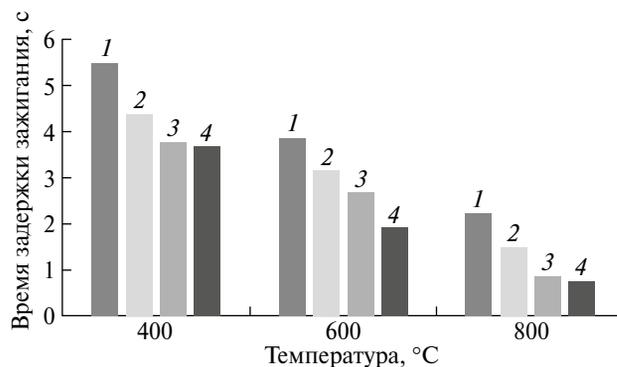
Подготовка биомассы осуществлялась аналогично углю. Частицы биомассы отбирали равными по массе (средняя масса одной древесной частицы составляла 0.009 мг). Частицы биомассы имели естественную форму.



**Рис. 3.** Принципиальная схема экспериментальной установки по исследованию зажигания пылевидных топлив в потоке воздуха: 1 – терморегулируемая муфельная печь; 2 – пылевидные частицы угля и древесины; 3 – держатель; 5 – высокоскоростная видеокамера; 9 – персональный компьютер; 4, 6, 8 – каналы связи между элементами установки.

Исследования процессов воспламенения топливных смесей в слое показали, что наиболее эффективно воспламеняются смеси в соотношении по массе (%) 50/50, поэтому исследования процессов воспламенения частиц угля и древесины выполнялись только при равных по массе частицах.

Предварительно перед экспериментами были определены технические характеристики исходных компонент (калорийность, зольность,



**Рис. 4.** Изменение времен задержки зажигания при слоевом сжигании смесевых топлив на основе угля месторождения Майкубен и тонкодисперсной древесины: 1 – У\_100%, Д\_0%; 2 – У\_90%, Д\_10%; 3 – У\_75%, Д\_25%; 4 – У\_50%, Д\_50%.

влажность и выход летучих) в соответствии с методиками, описанными в ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009), ГОСТ 11022-95, ГОСТ 27314-91 (ISO 589-81), ГОСТ 6382-2001.

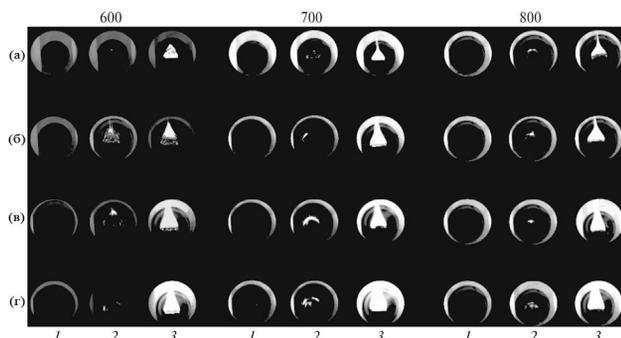
Анализ результатов технических характеристик исходных топливных компонент, приведенных в табл. 1, позволяет сделать вывод о существенном снижении зольности смесевых топлив (на 73%) с увеличением доли древесной компоненты в смеси до 50%, а также об относительно малом (на 8.2%) снижении калорийности исследуемых смесевых топлив на основе бурого угля и древесины.

С целью определения времен задержек зажигания частиц древесины и частиц угля, расположенных на некотором расстоянии друг от друга (1; 2 и 3 мм), была доработана экспериментальная установка (рис. 1), отличительным элементом которой является наличие нескольких металлических держателей с иглами (рис. 2), расположенными друг относительно друга на расстоянии (1; 2 и 3 мм).

Основные этапы эксперимента аналогичны исследованиям, выполняемым по определению времен задержек зажигания для топливных на-

**Таблица 1.** Результаты анализа технических характеристик исходных топливных компонент и смесей, сформированных на их основе (теплота сгорания, влажность, зольности и выход летучих)

Топливо	Технический анализ, %			Теплота сгорания, Q, МДж/кг
	$W^a$	$A^d$	$V^{daf}$	
0_Уголь / 100_Древесина	5.35	0.29	80.25	21.73
100_Уголь / 0_Древесина	5.17	7.61	44.70	24.75
90_Уголь / 10_Древесина	5.12	4.22	49.85	24.26
75_Уголь / 25_Древесина	5.98	3.22	54.95	23.97
50_Уголь / 50_Древесина	6.57	2.05	60.88	22.72



**Рис. 5.** Процесс зажигания пылевидных смесевых топлив, расположенных в слое: (а) – 100%\_У/0%\_Д; (б) – 90%\_У/10%\_Д; (в) – 75%\_У/25%\_Д; (г) – 50%\_У/50%\_Д).

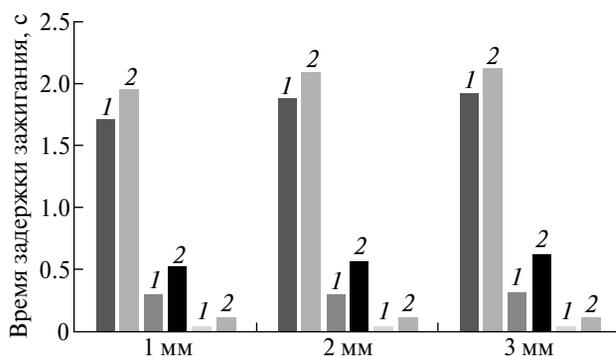
сок, исследуемых в слое. Методика эксперимента заключается в следующем: на держатель (3) крепятся две иглы на расстоянии (1; 2 и 3 мм). На одной игле закрепляется частица угля, на другой – частица древесной биомассы. Далее выполняются исследования по определению взаимного влияния одной частицы топлива на другую в широком диапазоне температур (600; 700 и 800°C).

В третьей части данной работы для подтверждения влияния древесной компоненты на процесс воспламенения частиц угля при сжигании смесевых топлив в потоке выполнялись исследования по определению времен задержек зажигания частиц смесевых топлив, сбрасываемых в нагретую среду моделируя процессы, протекающие при сжигании пылевидных топлив.

Эксперименты по определению времен задержки зажигания древесно-угольных смесей в потоке проводились по методике, подробно описанной в [22]. Для исследований использовался специальный экспериментальный стенд, обеспечивающий условия теплообмена высокотемпературной среды с частицами топлива, соответствующими условиям камеры сгорания котельного агрегата. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 3.

Смесевое топливо подготавливалось и формировалось таким же способом, как в первой части данной работы.

В начале эксперимента в терморегулируемой печи задавалась необходимая температура воздуха (600; 700 и 800°C). Температурное поле в камере регулировалось платинородиевой термопарой (4). Экспериментальные исследования проводились в окислительной среде (воздух).



**Рис. 6.** Влияние древесной компоненты на процесс воспламенения частицы угля с изменением расстояния одной от другой на 1, 2 и 3 мм: 1 – уголь, 2 – древесина.

Металлическим держателем 3 на расстоянии 1–2 см от камеры сгорания осуществлялся сброс навески топлива в момент начала видеофиксации. Временем задержки зажигания считалась разница между попаданием первых частиц пылевидного топлива в фокус камеры и моментом воспламенения первой частицы.

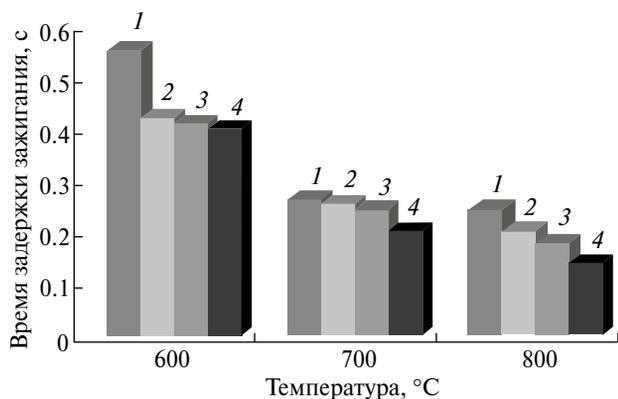
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные исследования для трех способов зажигания топливных смесей проводились в заданном диапазоне температур (600; 700 и 800°C).

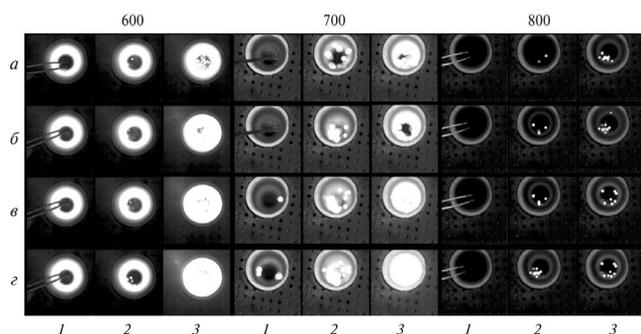
*Зажигание топливных смесей в слое.* Зависимости изменения времен задержки зажигания топливных смесей, сформированных на основе бурого угля и отходов лесопиления, приведены на рис. 4.

Анализ процессов воспламенения смесевых топлив при температуре 600°C показал, что при соотношении угля и древесной биомассы (%) 90/10 время задержки зажигания смеси уменьшилось по сравнению с воспламенением однородного угля на 1.2 с (с 5.51 до 4.36 с). При увеличении доли древесной компоненты в смеси до 25% время задержки воспламенения снизилось в 3 раза. При добавлении 50% древесной биомассы в уголь время задержки воспламенения смесей снизилось на 3.7 с, что является существенным по сравнению со временем воспламенения однородного угля.

При увеличении температуры в печи до 700°C также наблюдается снижение времени задержки зажигания смесей. При соотношении угля и древесной биомассы (%) 90/10 время задержки зажигания снизилось на 0.72. При добавлении 25% древесных отходов время задержки воспламене-



**Рис. 7.** Изменение времен задержки зажигания при поточном сжигании смесевых топлив на основе угля месторождения Майкубен и мелкодисперсной древесины (1 – У\_100%, Д\_0%; 2 – У\_90%, Д\_10%; 3 – У\_75%, Д\_25%; 4 – У\_50%, Д\_50%).



**Рис. 8.** Процесс зажигания витающих пылевидных смесевых топлив в диапазоне температур 600°C, 700°C и 800°C (а – 100%\_У/0%\_Д; б – 90%\_У/10%\_Д; в – 75%\_У/25%\_Д; г – 50%\_У/50%\_Д (1 – попадание в кадр частиц; 2 – начало процесса воспламенения; 3 – зажигание смесей).

ния снизилось на 1.19 с по сравнению с временем задержки воспламенения однородного угля. При равной концентрации компонент время задержки зажигания составило 1.92 с, что ниже значения для однородного угля практически в два раза.

При установленной в печи температуре 800°C результаты были следующими: время задержки зажигания однородного угля составило 2.24 с, при добавлении 10% древесной биомассы – снизилось на 0.75 с, а при добавлении 25% биомассы – еще на 0.63 с. При равной концентрации компонент время задержки зажигания составило 0.77 с, что существенно меньше значения, полученного для однородного угля на 34.4%.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что добавление древесной компоненты к углю значительно влияет на снижение

времени задержки зажигания смесевых топлив в равном по массе соотношении друг к другу.

На рис. 5 приведены типичные кадры процессов воспламенения смесевых топлив исследуемых навесок в широком диапазоне температур.

При исследовании процессов зажигания пылевидных смесевых топлив в слое достаточно сложно оценить влияние древесной компоненты на процесс воспламенения угля, так как частицы расположены в плотном контакте друг к другу, но это влияние является существенным. Поэтому было принято решение разработать методику исследования процессов воспламенения одной частицы угля и одной частицы древесины, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

*Зажигание частиц угля и древесины на расстоянии друг от друга.* По результатам экспериментальных исследований установлено, что расстояние между одной частицей древесины и одной частицей угля оказывает существенное влияние на интенсификацию процесса зажигания последней. На рис. 6 приведены результаты экспериментального определения времен задержки зажигания единичных частиц древесной биомассы и бурого угля, расположенных на расстоянии одна от другой на 1, 2 и 3 мм.

Анализ рис. 6 позволяет установить, что частица биомассы, расположенная на расстоянии до 2 мм от частицы угля, интенсифицирует процесс воспламенения последней во всем диапазоне температур от 600 до 800°C. Установлено, что воспламенение частицы угля, расположенной на расстоянии 1 мм от частицы древесины при температуре 600°C, происходит на 18.8% существенно интенсивнее, чем при расстоянии таких же частиц, расположенных на расстоянии 2 мм, при расположении частиц на расстоянии 3 мм друг от друга – показало практически полное отсутствие взаимного влияния на процесс воспламенения частиц угля. С увеличением температуры до 700°C частица угля, расположенная на расстоянии 1 мм от частицы древесины, воспламеняется быстрее на 6.7%, а при расстоянии 2 мм – на 6.3% быстрее по сравнению с воспламенением одиночной частицы угля. При расстоянии между частицами угля и древесины 3 мм частица древесины не оказывала никакого влияния на ускорение процесса воспламенения частицы угля – уголь воспламенился за то же время, что и одиночная частица. Аналогичные результаты показали эксперименты,

проведенные при температуре 800°C. При расстоянии между частицами угля и древесины, равном 2 мм и меньше, частица древесины существенно интенсифицировала зажигание частицы угля по сравнению с зажиганием одиночной угольной частицы. При расстоянии между частицами 3 мм такого влияния не наблюдалось, несмотря на то, что вокруг частиц скапливалось газовое облако.

Установленная закономерность позволяет обосновать существенный вклад биомассы на процессы воспламенения угольных частиц при их совместном сжигании в энергетических установках.

Выполненные эксперименты позволяют оценить влияние доли древесной составляющей на характеристики и кинетику воспламенения смесевых топлив в лабораторных условиях. В топках реальных энергетических котлов топливные частицы парят в потоке газов, представляющих собой смесь продуктов сгорания и воздуха. Для создания условий, наиболее приближенных реальному сжиганию топлив на электростанции, было предложено провести исследования по определению времен задержки зажигания смесевых топлив в вертикальной печи с имитацией пылевидного сжигания топлив.

*Зажигание топливных смесей в потоке воздуха.* На рис. 7 приведены результаты экспериментального исследования процессов воспламенения смесевых топлив на основе пылевидного угля и мелкодисперсных отходов переработки древесины.

Анализ рис. 7 позволяет установить, что время задержки зажигания снижается при увеличении доли древесной компоненты в смеси до 50%. При увеличении температуры в муфельной печи уменьшается также скорость процесса воспламенения частиц угля и древесины, о чем можно судить по типичным видеокдрам, приведенным на рис. 8. Также, как и в предыдущих исследованиях, установлено, что наиболее интенсивное воспламенение происходит при концентрации угля и древесины, равной по массе. При данной концентрации компонент реакции горения протекают гетерогенно за счет быстрого воспламенения летучих веществ. Увеличение доли древесины в смеси на 25% снижает время задержки воспламенения при температуре 600°C на 6.1%. При концентрации угля и древесной биомассы (%) 50/50 уменьшение времени задержки зажигания составляет 22.3%. Увеличение температуры в печи до 700°C также позволяет зафиксировать снижение времени задержки вос-

пламенения смесей. При повышении температуры до 800°C наблюдается существенное снижение времени задержки воспламенения смеси с долей древесной биомассы 50%. Время задержки воспламенения составило 0.14 с, тогда как время задержки зажигания однородного угля составляло 0.242 с. Разница между значениями составила 42%.

Можно отметить, что существенное влияние на характеристики и условия воспламенения оказывает температура внешней среды. Увеличение температуры на 200°C (с 600 до 800°C) приводит к двукратному ускорению процесса воспламенения однородного угля и почти к трехкратному ускорению процесса воспламенения смеси угля и древесины в соотношении по массе друг другу (%) 50/50.

На рис. 8 приведены типичные кадры процессов воспламенения витающих древесно-угольных смесей в широком диапазоне температур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментальных исследований установлено, что смесевые топлива, сформированные на основе угля и биомассы, – перспективный энергетический продукт.

Исследования процессов зажигания таких топлив в слое показали снижение времени задержки зажигания смесей с увеличением доли древесины до 50% в среднем на 18%.

Проведение экспериментальных исследований по зажиганию частиц угля и биомассы, расположенных на разном расстоянии друг от друга, позволило установить, что при расстоянии между одной частицей древесины и одной частицей угля, равном или меньше 2 мм, древесина оказывает существенное влияние на интенсификацию процесса зажигания угольной частицы.

При исследовании процессов зажигания смесевых топлив в потоке установлено существенное влияние температуры на характеристики и условия зажигания. Увеличение температуры с 600°C на 200 градусов способствовало почти трехкратному снижению времени задержки зажигания смесевых топлив при концентрации древесной компоненты в смеси с углем, равной 50%.

Многочисленные исследования зажигания частиц угля совместно с отходами лесопиления позволили экспериментальным способом доказать существенное влияние древесной

биомассы на ускорение процессов воспламенения и горения угля, как в условиях плотного слоя, так и при витании частиц в потоке слоя на некотором удалении друг от друга. Экспериментальные исследования подтверждают перспективность в последствии применения комбинированных топлив на энергетических установках для выработки тепловой или электрической энергии.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках объединения проектов: № 075-03-2021-138/3 (FZES-2021-0008) и 075-03-2022-108/5 (FSWW-2022-0018).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Zhang Y., Mckechnie J., Cormier D., Lyng R. // Environ Sci Technol. 2010. V. 44. № 1. P. 538. <https://doi.org/10.1021/es902555a>
- Volkova M.V. // Russian regions in the focus of change. 2019 (Ekaterinburg, Russia, November 17–19, 2022). P. 154.
- Yaqub Z.T., Oboirien B.O., Akintola A.T. // J. Mat. Cycles and Waste Management. 2021. Springer, 2021. V. 23. № 3. P. 899. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01180-0>
- Kaza S, Yao L., Bhada-Tata P., Van Woerden F. // What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. (Washington, DC: World Bank, 2018) (accessed: 15.12.2022).
- Qamar O., Jamil F., Hussain M., Al-Muhtaseb A., Inayat A., Waris A., Akhter P., Park Y. // Chem. Eng. J. 2023. V. 454. P. 140240. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.140240>
- Weldu Y.W., Assefa G., Jolliet O. // Appl. Energy. Elsevier. 2017. V. 187. P. 564. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.101>
- Syrodoy S. V., Kostoreva J.A., Kostoreva A.A., Asadullina L.I. // J. Energy Institute. Elsevier. 2020. V. 93. № 2. P. 443. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.07.007>
- Bai X., Lu G., Bennet T., Sarroza A., Eastwick C., Liu H., Yan Y. // Exp. Therm. Fluid Sci. Elsevier. 2017. V. 85. P. 322. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.03.018>
- Mouton L., Trigaux D., Allacker K., Röck M. // Energy Build. Elsevier. 2023. V. 282. P. 112678. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112678>
- Rohr A.C., Campleman S., Long Ch., Pererson M., Weatherstone S., Quick W., Lewis A. // Intern. J. Environmental Res. and Public Health 2015. V. 12. P. 8542. <https://doi.org/10.3390/ijerph120708542>
- Yankovsky S. Tolokol'nikov A., Gorshkov A., Misyukova A., Kuznetsov G. // App. Sci. (Switzerland). MDPI 2021. V. 11. № 24. P. 301. <https://doi.org/10.3390/app112411719>
- Xu Y., Yang K., Zhou J., Zhao G. // Sustainability 2020. V. 12. P. 3692. <https://doi.org/10.3390/su12093692>
- Xu Y., Axt Ch., Song M., Kneer R., Li Sh. // Proc. Combustion Institute. Elsevier. 2021. V. 38. № 3. P. 4179. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.131>
- Riaza J., Khatami R., Levendis Y., Alvarez L., Gil M., Pevinda C., Rubiera F., Pis J. // Biomass Bioenergy. Pergamon. 2014. V. 64. P. 162. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.018>
- Flower M., Gibbins J. // Fuel. Elsevier. 2009. V. 88. № 12. P. 2418. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.036>
- Wang G., Silva R., Azevedo J., Martins-Dias S., Costa M. // Fuel. Elsevier. 2014. V. 117. P. 809. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.080>
- Mason P., Darvell L., Pourkashanian M., Williams A. // Fuel. Elsevier. 2015. V. 151. P. 21. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.088>
- Qi S., Wang Zh., Costa M., He Y., Cen K. // Fuel. Elsevier. 2021. V. 283. P. 118956. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118956>
- Rashwan S., Ibrahim A., Abou-Arab Th., Nemitallah M., Habib M. // Energy. Elsevier Ltd. 2017. V. 122. P. 159–167. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.086>
- Янковский С.А., Кузнецов Г.В., Мисюкова А.Д. // ХТТ. 2022. № 1. P. 57. [Solid Fuel Chemistry, 2022. V. 1. P. 57. <https://doi.org/10.31857/S0023117722010108>
- Kuznetsov G., Cherednik I., Galaktionova A., Yankovsky S. // J. Phys. Conf Ser. 2021. V. 2057. № 1. P. 012128. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2057/1/012128>

## Research of the Processes of Ignition and Combustion of Mixed Fuels Based on Coal and Wood under Different Conditions of Thermal Influence

A. D. Misyukova<sup>1,2,\*</sup>, S. A. Yankovsky<sup>1,2,\*\*</sup>, A. K. Berikbolov<sup>1,\*\*\*</sup>, N. S. Yankovskaya<sup>1,\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634059 Russia

<sup>2</sup>Gorbachev Kuzbass State University, Kemerovo, 650000 Russia

\*e-mail: adm14@tpu.ru

\*\*e-mail: jankovsky@tpu.ru

\*\*\*e-mail: akb10@tpu.ru

\*\*\*\*e-mail: nsy4@tpu.ru

The ignition processes of mixed fuels formed on the basis of grade 3B coal from the Maikuben deposit and finely dispersed sawmill and woodworking waste have been studied. An analysis of the processes of ignition and combustion of fuel mixtures with different organization of combustion processes was performed. It has been established that the concentration of the wood component has a significant impact on the processes of the onset of oxidation and combustion of mixed fuels. When the proportion of wood component in the mixture increases to 50%, the ignition delay time decreases by an average of 18% in all cases of the studies performed.

*Keywords:* coal, wood, biomass, sawmill waste, ignition, mixed fuels