

УДК 662.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ И ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЖИГАНИЯ ЧАСТИЦ ВЛАЖНОЙ ДРЕВЕСИНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ

Косторева Жанна Андреевна¹,
zhanna.kostoreva@yandex.ru

Малышев Дмитрий Юрьевич¹,
dmitry.mlv@gmail.com

Сыродой Семен Владимирович¹,
ssyrodoy@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. Анализ прогнозов специалистов показывает, что рост потребления электроэнергии в мире до 2030 г. составит 2,4 %. На сегодняшний день вырабатываемая на тепловых электрических станциях энергия составляет 2/3 от общей вырабатываемой всеми источниками. Большинство этих ТЭС в качестве топлива используют уголь. Доля ТЭС, использующих это топливо, – 40 %. При сжигании угля происходит интенсивное выделение загрязняющих веществ, таких как NO_x и SO_x, основные последствия которого: ухудшение состояния здоровья человека, смог, кислотные дожди, парниковый эффект и пыление. Одним из новых инновационных решений экологических проблем угольной энергетики может стать сжигание биомассы (отходы лесопиления и лесного хозяйства). По оценкам специалистов объем запасов древесины в России превышает 82·10⁹ м³ и составляет 25 % от мировых запасов. Отходы ее переработки составляют более 30·10⁶ м³ в год. Интерес к использованию древесной биомассы также обуславливается постоянно возрастающими требованиями по экологичности объектов теплоэнергетики.

Цель: экспериментальное установление зависимостей условий (минимальных температур) и характеристик (времен задержки) зажигания от вида древесной биомассы и её влагосодержания на примере четырех достаточно доступных и широко распространенных видов древесины (наиболее калорийной и поэтому перспективной для теплоэнергетики).

Объект: сухая и насыщенная влагой древесина четырех видов (кедр, лиственница, сосна и осина). Экспериментальные исследования проведены для древесных частиц с относительной влажностью: 5, 30 и 45 %.

Метод: экспериментальное определение с использованием высокоскоростной видеокамеры Photron FASTCAM CA4 временных характеристик процессов зажигания частиц древесины в условиях, соответствующих по интенсивности нагрева камерам сгорания паровых и водогрейных котлов; регистрация температуры среды с использованием хромель-алюмелевых термопар.

Результаты. Приведены выполненные с целью обоснования ресурсоэффективности использования в теплоэнергетике древесной биомассы (как базового топлива паровых и водогрейных котлов) результаты экспериментальных исследований процессов зажигания сухих и влажных частиц четырех видов древесной биомассы в среде нагретого до высоких температур воздуха. Установлено существенное влияние вида древесины на условия и характеристики зажигания её одиночных частиц. Также установлено значительное влияние влажности на времена задержки зажигания частиц исследованных видов биомассы. Такие времена, соответствующие древесине в естественном состоянии, в 3–4 раза превышают во всем (достаточно широком) диапазоне изменения значимых для практики температур времена задержки зажигания сухих частиц древесины. Установленные в проведенных экспериментах закономерности иллюстрируют перспективность использования в теплоэнергетике древесной биомассы как основного топлива или компоненты древесно-угольной смеси.

Ключевые слова:

Влажная древесина, биомасса, зажигание, время задержки зажигания, термическая подготовка топлива, эксперимент, энергоэффективность.

Введение

Одним из основных признаков ресурсоэффективного промышленного производства является использование возобновляемых источников энергии [1]. По этой причине три последние десятилетия усилия ученых и инженеров всех развитых государств направлены на разработку научных основ использования возобновляемых в классической интерпретации этого термина (солнце, ветер, биомасса, геотермальная энергия) источников энергии (ВИЭ) [2]. Но, несмотря на многомиллиардные затраты на исследования и разработки в этой области науки, пока не достигнуты планировавшиеся в конце XX в. объемы выработки электрической энергии к 2020 г. в результате работы ВИЭ [3, 4]. Более того, в последние годы отчетливо

проявляется тенденция изменения содержания определения «возобновляемые источники энергии» во многих европейских государствах. К ВИЭ стали относить не только гидроэлектростанции, но даже атомные электрические станции, возможно, с целью формального увеличения доли возобновляемых источников в общем объеме выработки электрической энергии [5, 6].

Такое состояние работ по ВИЭ обусловлено, очевидно, объективными трудностями создания устойчивых (не зависящих в первую очередь от времени года, суток и погоды) установок и аппаратов для выработки электрической энергии при использовании ветра и солнечного излучения [7, 8]. По этим причинам самым надежным и устойчивым к временным

воздействиям разного рода источником энергии (возобновляемым без больших проблем) является биомасса [9]. При этом самым ресурсоэффективным и экологически значимым вариантом использования биомассы, скорее всего, является её прямое сжигание в топках паровых и водогрейных котлов большой (тепловые электрические станции) и малой (котельные и локальные системы теплоснабжения) энергетики [10]. Переработка биомассы в жидкое или газообразное топливо сопряжена с большими затратами энергии [11] и, как показали результаты многочисленных исследований (например, [12, 13]) в течение трех последних десятилетий, не является ресурсоэффективной в прямом смысле этого слова технологией.

Но и технология прямого сжигания биомассы в топках паровых и водогрейных котлов тоже достаточно сложная задача, решение которой в общем виде пока не получено – доля котельного оборудования с топливом биомассой составляет в России менее 1 % (в других государствах аналогично). Такое состояние дел во многом обусловлено тем, что любая биомасса (в том числе наиболее привлекательная для теплоэнергетики – древесина) в своем обычном состоянии является влагонасыщенной [14]. Предварительное же удаление влаги, например, из измельченной древесины, достаточно энергоемкий процесс. Кроме того, для влагоудаления необходимо определенное время.

Избыточная же влага (характерная для естественного состояния биомассы) существенно замедляет процесс зажигания частиц биомассы и увеличивает время их пребывания в топочной камере (или предтопке). Соответственно, увеличиваются затраты энергии и времени на влагоудаление, а зажигание затягивается. При этом недостаточно изучены пока закономерности зажигания частиц биомассы для того, чтобы ответить на вопрос о том, как влияет вид биомассы на условия и характеристики зажигания её частиц. В этой связи на основании анализа литературы по исследованию процессов, протекающих при использовании биомассы в энергетике [15, 16], можно сформулировать проблему – отсутствие объективной информации о функциональных связях характеристик зажигания биомассы (в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов), содержания влаги и вида биомассы.

Для решения этой проблемы теоретическая база пока недостаточно полная. К настоящему времени разработаны физические (например, [17, 18]) и математические (например, [19]) модели испарения жидкостей с поверхности капель в высокотемпературных газовых средах и методы решения соответствующих краевых задач [19, 20]. Но теория [17–20] не применима к описанию процессов выхода влаги из пористой структуры влагонасыщенной древесины, даже в случае частиц малых размеров. Выход влаги из древесины в последнем случае зависит не только от температуры поверхности испарения и концентрации паров вблизи этой поверхности [20]. Важным параметром, определяющим скорость влагоудаления, является проницаемость древесины, которая зависит от вида древесины и её возраста и во многих случаях не из-

вестна. В этой связи теоретическое прогнозирование условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины с использованием, например, моделей [21–23] часто невозможно.

Методика экспериментальных исследований

Очевидно, что сжигание любой биомассы (в том числе и древесной) тем более эффективно, чем меньше характерный размер отдельной топливной частицы [24]. Так, например, установлено экспериментально [25] и теоретически [26], что время задержки зажигания частиц углей, капель водоугольного топлива [27] и частиц древесины [21] прямо пропорционально характерному размеру частицы или капли топлива. Поэтому целесообразны эксперименты с частицами древесины малых размеров (единицы миллиметров).

Экспериментальные исследования влияния вида древесины и влажности её частиц на характеристики воспламенения проводились на экспериментальном стенде, который по своим методам измерения и обработки результатов соответствует экспериментальной установке, приведенной в [23, 24, 28, 29].

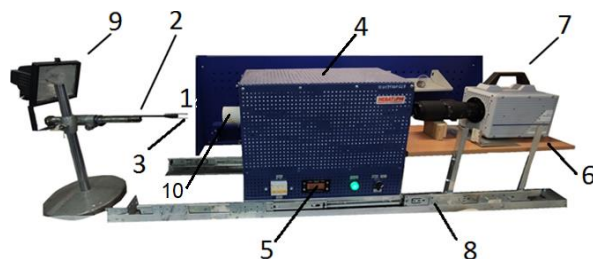


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – частица древесины; 2 – держатель частицы; 3 – металлическая игла; 4 – высокотемпературная печь; 5 – экран; 6 – подвижная площадка; 7 – высокоскоростная видеокамера; 8 – платформа для передвижения подвижной площадки; 9 – прожектор; 10 – керамический цилиндр

Fig. 1. Experimental stand: 1 – wood chips; 2 – particle holder; 3 – metal needle; 4 – high-temperature furnace; 5 – screen; 6 – movable platform; 7 – high-speed video camera; 8 – platform for moving the movable platform; 9 – searchlight; 10 – ceramic cylinder

Для каждой температуры внешней среды и одного вида древесины одной влажности количество опытов могло варьироваться, но для достижения необходимой точности определения времени задержки зажигания (tign) было не менее 15. Обработка результатов проводилась методом наименьших квадратов. Систематические погрешности составляли не более 1 %, случайные – менее 10 %.

В экспериментах использовались частицы древесины в форме куба с характерным размером 4 мм, вырезанные из большого монолитного фрагмента сухой древесины с помощью лазерного резака. Наиболее эффективно сжигание в топках котельных агрегатов любого вида древесины в измельченном до минимально возможных характерных размеров одиночных частиц состоянии. Но такое измельчение очень

энергозатратный процесс, и важны оценки условий зажигания (а также и полного сгорания) максимально больших по размерам частиц древесины. Времена задержки зажигания частиц любых конденсированных веществ линейно зависят от их характерного размера [21]. Поэтому, зная эти времена для частиц двух размеров, можно интерполяцией (или, если есть необходимость, экстраполяцией) определить $t_{ign}(T)$ частиц древесной биомассы для других характерных размеров.

При этом необходимо учитывать, что, как показали проведенные эксперименты, чем больше размер частицы, тем меньше погрешности в определении характеристик процесса их зажигания.

Погрешности определения размеров частиц составляли не более 0,2 мм. Использувавшиеся в экспериментах виды древесины: кедр, лиственница, сосна и осина. Влажность сухих образцов составляла – 6–7 % (соответствует влажности пиломатериалов при хранении), влажность специально подготовленных (увлажненных) образцов – 40–42 % (соответствует естественной влажности свежесрубленного дерева).

Также следует пояснить, что выбор исследуемых пород древесины обусловлен не только высокой вероятностью их масштабного использования в энергетике (сосна и осина). Кедр и лиственница, конечно, не являются энергетическим сырьем по целому ряду объективных причин, но их структура существенно отличается от структуры перспективных видов древесины и эксперименты с этими породами древесины целесообразны как основа для объективного анализа и обобщения.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 2 представлены результаты экспериментов в виде традиционной для теории зажигания конденсированных веществ форме – зависимости времен задержки зажигания от температуры среды.

Анализ зависимостей $t_{ign}(T)$ (рис. 2.) показывает, что вид древесины может оказывать значимое (до 25 %) влияние на характеристики и условия воспламенения её частиц при относительно умеренных температурах среды. Так, статистический анализ по непараметрическому критерию Вилкоксона–Манна–Уитни [30] показывает, что времена задержки зажигания частиц древесины на основе лиственницы отличаются значительно от значений $t_{ign}(T)$ сосны, кедра и осины. При этом такой же статистический сравнительный анализ значений $t_{ign}(T)$ частиц кедра и осины показывает, что при критерии значимости $\zeta=0,01$ в условиях относительно низких температур внешней среды ($T \sim 873$ K) времена задержки зажигания этих двух видов древесины отличаются статистически незначительно.

Приведенные на рис. 2 результаты экспериментов показывают, что естественное влагосодержание пористой структуры любой древесины (из четырёх исследованных) приводит к росту в 3–4 раза времён задержки зажигания по сравнению с сухой древесиной. Такое большое увеличение t_{ign} характерно для всего диапазона (возможного в топочных условиях) изменения температур внешней, по отношению к частице биомассы, среды (даже при $T \sim 1273$ K).

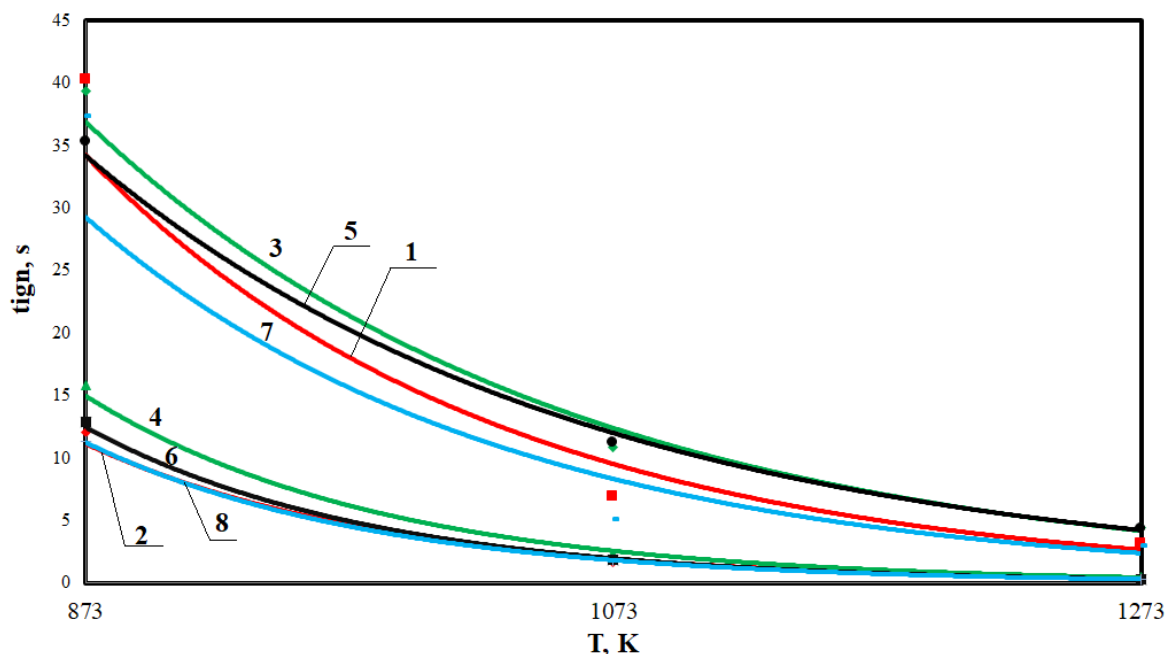


Рис. 2. Зависимости времен задержки зажигания древесных частиц от температуры внешней среды: 1 – насыщенная влагой частица кедра; 2 – сухая частица кедра; 3 – насыщенная влагой частица лиственницы; 4 – сухая частица лиственницы; 5 – насыщенная влагой частица сосны; 6 – сухая частица сосны; 7 – насыщенная влагой частица осины; 8 – сухая частица осины

Fig. 2. Dependences of the ignition delay times of wood particles on the ambient temperature: 1 – moisture-saturated cedar particle; 2 – dry cedar particle; 3 – moisture-impregnated larch particle; 4 – dry larch particle; 5 – moisture-saturated pine particle; 6 – dry pine particle; 7 – moisture-saturated aspen particle; 8 – dry aspen particle

Влияние влаги, насыщающей пористую структуру древесины в её естественном состоянии, на численные значения времен задержки зажигания достаточно очевидно, но не очевидна степень этого влияния. Объяснить приведенные на рис. 2 увеличение в 3–4 раза значения t_{ign} при увлажнении древесины можно тем, что процесс выхода паров воды из пористой структуры древесины приводит к образованию вокруг частицы слоя паров, температура которых существенно ниже температуры горячего воздуха, окружающего частицу. В результате этого резко снижается температура в каждой точке частицы, тепловой поток к поверхности

частицы и градиент концентрации паров воды вблизи поверхности испарения (от которого линейно зависит скорость этого фазового перехода). Можно сказать, что слой водяных паров вокруг древесины защищает её от нагрева и последующего зажигания.

Следует также отметить, что в экспериментах установлены предельные условия зажигания влажных частиц древесины. При температуре окружающей среды $T < 873$ К времена задержки зажигания насыщенных влагой частиц превышали 60 секунд, а сухой – более 35 секунд (рис. 3). Очевидно, что такие большие t_{ign} неприемлемы на практике.

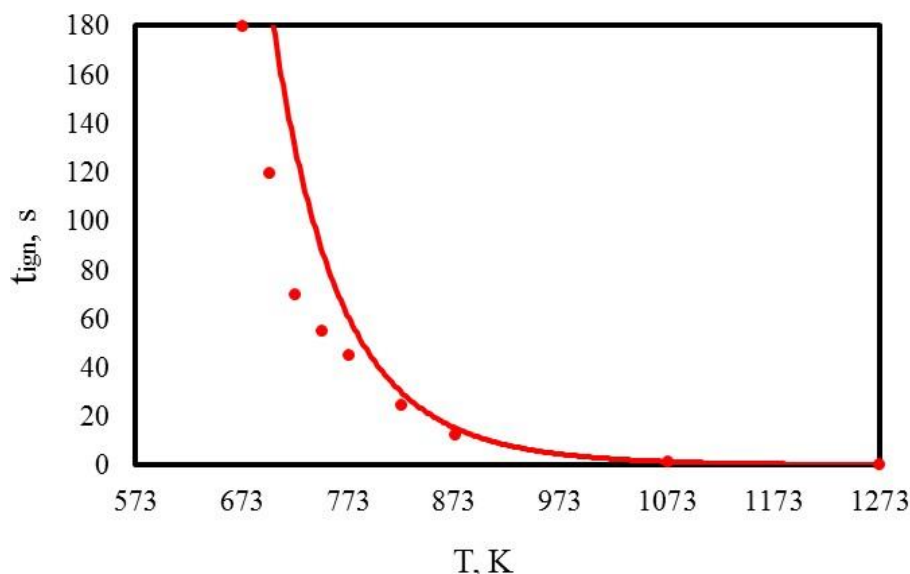


Рис. 3. Зависимость времен задержки зажигания сухих древесных частиц осины от температуры внешней среды
Fig. 3. Dependence of the ignition delay time of dry aspen wood particles on the ambient temperature

Таблица. Аппроксимационные выражения для кривых $t_{ign}(T)$

	Approximation expressions for $t_{ign}(T)$	
	насыщенная влагой частица moisture-saturated particle	сухая частица dry particle
Кедр Cedar	$9096,2 \cdot e^{-0,006T}$	$23206 \cdot e^{-0,009T}$
Лиственница Larch	$4324,9 \cdot e^{-0,005T}$	$33519 \cdot e^{-0,009T}$
Сосна Pine	$3308 \cdot e^{-0,005T}$	$40390 \cdot e^{-0,009T}$
Осина Aspen	$32274 \cdot e^{-0,009T}$	$7070,1 \cdot e^{-0,006T}$

На рис. 4. приведены типичные кадры видеоплазм экспериментов, на которых хорошо видны все основные стадии процесса как инертного нагрева частиц исследуемых видов древесины, так и непосредственно их зажигания. Третьи кадры каждого ряда соответствуют моменту появления пламени на поверхности частиц (как правило, это угловые точки).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в реальной практике сжигания древесины в топках паровых и водогрейных котлов необходимо минимизировать содержание влаги в биомассе до допустимых предельных значений концентраций. Это можно делать на стадии топливопод-

готовки в результате использования тепла отводимых топочных газов. В этой связи становится актуальной задача определения оптимальной по группе основных критериев (затраты энергии на измельчение древесины и её сушку, пожаробезопасности процесса топливоподготовки, экономической эффективности использования древесины как топлива в теплоэнергетике) технологии сжигания влажной на стадии топливоподготовки древесины.

Также проведены эксперименты с целью установления зависимости времен задержки зажигания исследуемых видов древесины от начальной влажности частиц. Результаты экспериментов приведены на рис. 5.

$$\varphi = \frac{m_k - m_0}{m_k} \cdot 100 \%,$$

m_k – масса насыщенной влагой частица; m_0 – начальная масса частицы.

Анализ экспериментальных зависимостей $t_{ign}(\varphi)$ (рис. 5) показывает, что увеличение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45 % приводит к росту времен задержки зажигания для частиц осины почти в 4 раза, а для частиц сосны почти в 5 раз. Можно сделать обоснованный вывод, что сушка древесины на стадии топливоподготовки является эффективным инструментом повышения эффективности технологий топливосжигания древесной биомассы на тепловых электростанциях.

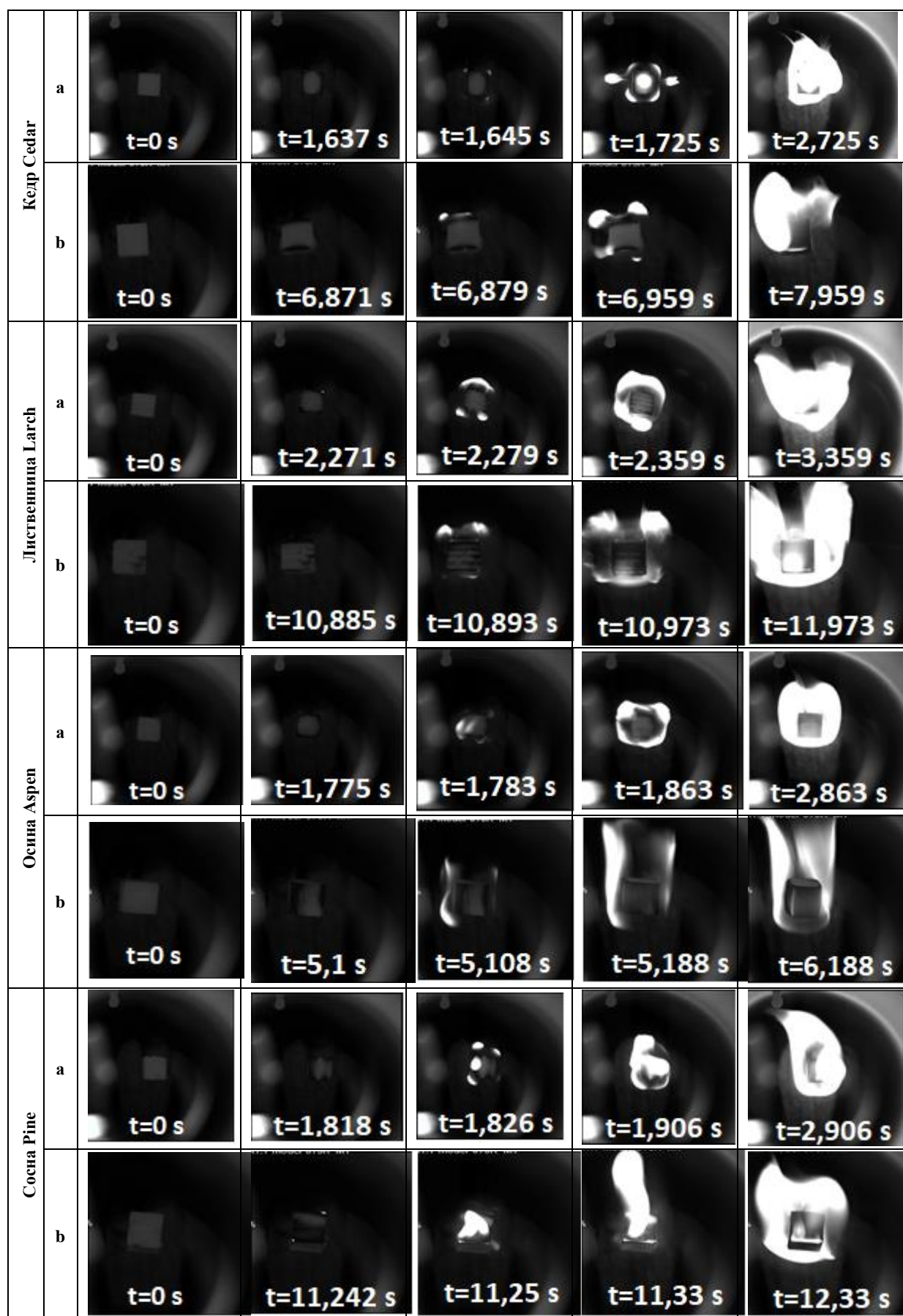


Рис. 4. Типичные кадры процесса воспламенения частицы древесины при $T=1073\text{ K}$: а) сухая; б) насыщенная влагой
 Fig. 4. Typical video recording of the ignition of a wood particle at $T=1073\text{ K}$: a) dry; b) moisture-saturated

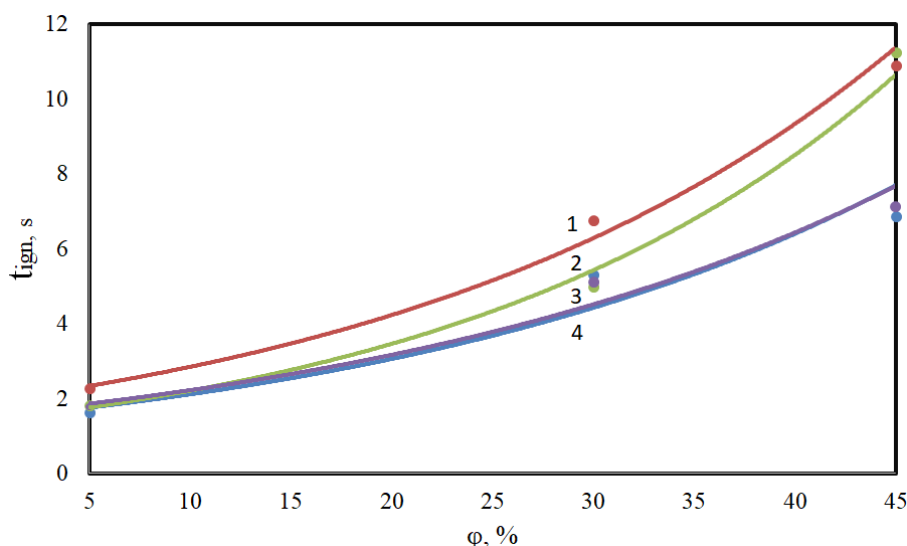


Рис. 5. Зависимость времен задержки зажигания древесных частиц от их относительной влажности ϕ при температуре внешней среды $T=1073$ К: 1 – лиственница; 2 – сосна; 3 – осина; 4 – кедр

Fig. 5. Dependence of the ignition delay time of wood particles on their relative humidity ϕ at ambient temperature $T=1073$ К: 1 – larch; 2 – pine; 3 – aspen; 4 – cedar

Также приведенные на рис. 5 результаты экспериментов дают основание для вывода о сильном влиянии структуры древесины на характеристики ее зажигания во влажном состоянии. Пример лиственницы, которая вследствие своей прочности и высокой плотности является уникальной породой древесины для строительства деревянных домов на многие десятилетия, показывает, что характеристики ее зажигания (t_{ign}) в сухом состоянии незначительно отличаются от времен задержки зажигания древесины двух других хвойных пород (кедра и сосны) – отличия t_{ign} составляют около 0,5 с. Во влажном же состоянии высокая плотность лиственницы (и, соответственно, низкая проницаемость) приводит к тому, что t_{ign} лиственницы превышает при $T=1073$ К время задержки зажигания сосны на 4 секунды. Этот результат дает основание для вывода о том, что на интенсивность процесса влагоудаления из частицы древесины влияет не только температура среды, но, в значительной степени, и условия выхода паров воды из пористой структуры древесины.

Анализ установленных в проведенных экспериментах закономерностей позволяет сделать заключение и о том, что даже при относительной влажности частиц древесины 25 % их времена задержки зажигания в 3–4 раза меньше аналогичных характеристик водоугольных топлив [28] идентичных размеров. Установлено, что совместное сжигание измельченных углей и древесины приводит к существенному снижению концентрации антропогенных выбросов (NO_x и SO_x) в газообразных продуктах сжигания древесно-угольных смесей [31] уже при концентрации древесной биомассы 10–15 %. Поэтому при сжигании даже относительно крупных частиц древесины в смеси с углем возможно достижение низких концентраций антропогенных оксидов в дымовых газах в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов при малых временах задержки зажигания.

Кроме того, известно [29], что при нагреве смеси измельченных частиц угля и древесины первыми начинают гореть частицы более мелких фракций (такими чаще всего являются в реальных условиях угольные), которые инициируют в дальнейшем зажигание более крупных частиц древесной биомассы. Соответственно нет необходимости кардинально изменять конструкцию топki при переходе от сжигания угля на древесно-угольную смесь, как, например, при переходе на водоугольное топливо. В последнем случае необходимо использовать или специальный предтопок, или организовать циркуляционное движение капель водоугольного топлива в большой по размерам (по сравнению с предназначенной для сжигания углей) топке.

Заключение

На основании анализа результатов выполненных экспериментальных исследований можно сделать вывод о существенном влиянии вида древесной биомассы на условия и характеристики зажигания её частиц в высокотемпературной газовой среде. Чем больше влажность, тем значительнее влияние вида древесины на времена задержки зажигания частиц. При этом времена задержки зажигания всех четырех исследованных достаточно типичных видов древесины, которые могут использоваться в энергетике, в естественном (влажном) состоянии в 3–4 раза выше аналогичных времен сухой древесины.

Результаты проведенных экспериментов также показывают, что сжигание древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов может повысить существенно ресурсоэффективность теплоэнергетики при реализации комплекса мероприятий по контролю влагосодержания древесины и удалению избыточной влаги (в случае необходимости) на стадии топливоподготовки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system / N. Aste, P. Caputo, C. del Pero, G. Ferla, H. Enrique, H. Cardenas, F. Leonforte, A. Miglioli // *Energy*. – 2020. – V. 206. – 11809.
2. Data supporting the forecast of electricity generation capacity from non-conventional renewable energy sources in Colombia / A. Sagastume Gutiérrez, M. Balbis Morejóna, J. José Cabello Eras, M. Cabello Ulloa, F. Javier Rey Martínez, J. Gabriel Rueda-Bayona // *Data in Brief*. – 2020. – V. 28. – 104949.
3. Goodarzi Sh., Niles Perera H., Bunn D. The impact of renewable energy forecast errors on imbalance volumes and electricity spot prices // *Energy Policy*. – 2019. – V. 134. – 110827.
4. Coester A., Hofkes M.W., Papyrakis E. Economics of renewable energy expansion and security of supply: A dynamic simulation of the German electricity market // *Applied Energy*. – 2018. – V. 231. – P. 1268–1284.
5. Total primary energy supply (TPES) by source // Germany 1990–2018. URL: <https://www.iea.org/countries/germany> (дата обращения: 15.10.2020).
6. Renewable energy prospects: Germany. URL: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Germany_report_2015-\(1\).pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Germany_report_2015-(1).pdf) (дата обращения: 15.10.2020).
7. Galvan E., Mandal P., Sang Y. Networked microgrids with rooftop solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. – 2020. – V. 123. – 106239.
8. David A. Wood. Hourly-averaged solar plus wind power generation for Germany 2016: Long-term prediction, short-term forecasting, data mining and outlier analysis // *Sustainable Cities and Society*. – 2020. – V. 60. – 102227.
9. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: an assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy // Mukesh Kumar Awasthi, Surendra Sarsaiya, Anil Patel, Ankita Juneja, Rajendra Prasad Singh, Binghua Yan, Sanjeev Kumar Awasthi, Archana Jain, Tao Liu, Yumin Duan, Ashok Pandey, Zengqiang Zhang, Mohammad J. Taherzadeh // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – V. 127. – 109876.
10. The energy potential of agriculture, agroindustrial, livestock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. The case of Colombia / A. Sagastume Gutiérrez, J.J. Cabello Eras, L. Hens, C. Vandecasteele // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – V. 269. – 122317.
11. Markel E., Sims Ch., Burton C. English policy uncertainty and the optimal investment decisions of second-generation biofuel producers // *Energy Economics*. – 2018. – V. 76. – P. 89–100.
12. Catalán-Martínez D., Domínguez M.E., Serra J.M. Liquid fuels from biomass: An energy self-sustained process integrating H₂ recovery and liquid refining // *Fuel*. – 2018. – V. 212. – P. 353–363.
13. Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: products applications and challenges to develop large-scale operations / Ramon Filipe Beims, Yulin Hu, Hengfu Shui, Chunbao (Charles) Xu // *Biomass and Bioenergy*. – 2020. – V. 135. – 105510.
14. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying / Zhengbin He, Jing Qian, Lijie Qu, Zhenyu Wang, Songlin Yi // *Results in Physics*. – 2019. – V. 12. – P. 1299–1303.
15. Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace / Shusen Wang, Chun Zou, Chun Lou, Haiping Yang, Mei Mei, Huixiang Jing, Sizhe Cheng // *Bioresource Technology*. – 2020. – V. 310. – 123456.
16. Ignition and combustion of single pulverized biomass and coal particles in N₂/O₂ and CO₂/O₂ environments / Sheng Qi, Zhihua Wang, Mário Costa, Yong He, Kefa Cen // *Fuel*. – 2021. – V. 283. – 118956.
17. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases // *Technical Physics*. – 2014. – V. 59 (7). – P. 959–967.
18. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases // *Technical Physics Letters*. – 2014. – V. 40 (6). – P. 499–502.
19. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование влияния конвекции в смеси продуктов сгорания на интегральные характеристики испарения движущейся капли тонкораспыленной воды // *Инженерно-физический журнал*. – 2014. – Т. 87 (1). – С. 98–106.
20. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокapельных потоках // *Новосибирский государственный технический университет*. – 2009. – № 282. – С. 282.
21. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of itsignition in the high-temperature medium // *Renewable Energy*. – 2020. – V. 145. – P. 1474–1486.
22. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Испарение капель воды в высокотемпературной газовой среде // *Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси*. – 2019. – № 89 (1). – С. 133–142.
23. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva, A.A. Kostoreva, Zh.A. Kostoreva // *Fuel*. – 2019. – V. 252. – P. 19–36.
24. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, D.Yu. Malyshev, N.Yu. Gutareva, N.A. Nigay // *Ignition stage. Applied Thermal Engineering*. – 2020. – V. 170. – 115034.
25. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 106. – P. 561–569.
26. Mathematical and physical modeling of the coal-water coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface / V. Salomatov, G. Kuznetsov, S. Syrodoy, N. Gutareva // *Energy Reports*. – 2020. – V. 6. – P. 628–643.
27. Conditions of the water–coal fuel drop dispersion at their ignition in the conditions of high temperature heating / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Combustion science and technology*. – 2019. – V. 191. – P. 2162–2184.
28. Малышев Д.Ю., Сыродой С.В., Косторева Ж.А. Совместное загорание водоугольной суспензии и древесной биомассы // *Промышленная энергетика*. – 2020. – № 5. – С. 44–49.
29. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces / S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I. Asadullina // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93 (2). – P. 443–449.
30. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1947. – № 18. – P. 50–60.
31. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood / G.V. Kuznetsov, S.A. Yankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov, I.V. Cherednik // *Energy*. – 2020. – V. 194. – 116896.

Поступила 26.10.2020 г.

Информация об авторах

Косторева Ж.А., аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Малышев Д.Ю., аспирант Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Сыродой С.В., кандидат технических наук, научный сотрудник Инженерной школы энергетики НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 662.7

DEFINITION OF WET WOOD PARTICLES IGNITION CONDITIONS AND CHARACTERISTICS TO INCREASE THE RESOURCE EFFICIENCY OF HEAT POWER ENGINEERING

Zhanna A. Kostoreva¹,
zhanna.kostoreva@yandex.ru

Dmitry Yu. Malyshev¹,
dmitry.mlv@gmail.com

Semen V. Syrodoy¹,
ssyrodoy@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. Analysis of experts' forecasts shows that the growth in global electricity consumption until 2030 will be 2,4 %. Today, the energy generated at thermal power plants is 2/3 of the total energy generated by all sources. For most thermal power plants, coal is the main fuel. The share of thermal power plants burning coal reaches 40 %. Burning coal leads to intense emissions of nitrogen oxides and sulfur, the main consequences of which are deterioration in human health, smog and acid rain. One of the new solutions to the environmental problems of the energy industry is the combustion of biomass (sawmill and forestry waste). According to experts, the volume of timber reserves in Russia exceeds $82 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ and accounts for 25 % of the world reserves. Waste from its processing is more than $30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ per year. Environmental requirements for heat and power facilities are constantly growing. This determines the interest in biomass use.

The main aim of the research is to determine experimentally the dependences of ignition delay times during high-temperature heating of woody biomass of different moisture content using the example of four fairly accessible and widespread wood species (the most high-calorie and, therefore, promising) for heat power engineering.

Object: dry and moisture-saturated wood of four types (cedar, larch, pine and aspen). Experimental studies were carried out for wood particles with relative humidity: 5, 30 and 45 %.

Methods: experimental determination of the ignition temporal characteristics of wood particles under conditions corresponding to the intensity of heating to the combustion chambers of steam and hot water boilers using a high-speed video camera Photron FASTCAM CA4; registration of medium temperature using chromel-alumel thermocouples.

Results. The paper introduces the results of the experimental studies of ignition of dry and wet particles of four type of woody biomass in the environment of air heated to high temperatures in order to substantiate the resource efficiency of using woody biomass (as the base fuel of steam and hot water boilers). A significant effect of the wood type on the ignition conditions and characteristics of its single particles was established. A significant influence of humidity on the ignition delay times of particles of the studied types of biomass was established as well. Such times, corresponding to wood in its natural state, are 3–4 times higher in the entire (rather wide) range of change of temperatures significant for practice, the ignition delay times of dry wood particles. The regularities established in the conducted experiments illustrate the prospects of using woody biomass in heat power engineering as the main fuel or components of a charcoal mixture.

Key words:

Wet wood, biomass, ignition, ignition delay time, thermal fuel preparation, experiment, energy efficiency.

The research was carried out due to the grant of the Russian Science Foundation (project no. 18-79-10015).

REFERENCES

1. Aste N., Caputo P., Del Pero C., Ferla G., Enrique H., Cardenas H., Leonforte F., Miglioli A. A renewable energy scenario for a new low carbon settlement in northern Italy: biomass district heating coupled with heat pump and solar photovoltaic system. *Energy*, 2020, vol. 206, 118091.
2. Sagastume Gutiérrez A., Balbis Morejóna M., José Cabello Eras J., Cabello Ulloa M., Javier Rey Martínez F., Gabriel Rueda-Bayona J. Data supporting the forecast of electricity generation capacity from non-conventional renewable energy sources in Colombia. *Data in Brief*, 2020, vol. 28, 104949.
3. Goodarzi Sh., Niles Perera H., Bunn D. The impact of renewable energy forecast errors on imbalance volumes and electricity spot prices. *Energy Policy*, 2019, vol. 134, 110827.
4. Coester A., Hofkes M.W., Papyrakis E. Economics of renewable energy expansion and security of supply: A dynamic simulation of the German electricity market. *Applied Energy*, 2018, vol. 231, pp. 1268–1284.
5. *Total primary energy supply (TPES) by source. Germany 1990–2018*. Available at: <https://www.iea.org/countries/germany> (accessed 15 October 2020).
6. *Renewable energy prospects: Germany*. Available at: [https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Germany_report_2015-\(1\).pdf](https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2015/IRENA_REmap_Germany_report_2015-(1).pdf) (accessed 15 October 2020).
7. Galvan E., Mandal P., Sang Yu. Networked microgrids with rooftop solar PV and battery energy storage to improve distribution grids resilience to natural disasters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 123, 106239.
8. David A. Wood. Hourly-averaged solar plus wind power generation for Germany 2016: Long-term prediction, short-term forecasting, data mining and outlier analysis. *Sustainable Cities and Society*, 2020, vol. 60, 102227.
9. Mukesh Kumar Awasthi, Surendra Sarsaiya, Anil Patel, Ankita Juneja, Rajendra Prasad Singh, Binghua Yan, Sanjeev Kumar Awasthi, Archana Jain, Tao Liu, Yumin Duan, Ashok Pandey, Zengqiang Zhang, Mohammad J. Taherzadeh. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: an assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, vol. 127, 109876.
10. Sagastume Gutiérrez A.s, Cabello Eras J.J., Hens L., Vandecasteele C. The energy potential of agriculture, agroindustrial, live-

- stock, and slaughterhouse biomass wastes through direct combustion and anaerobic digestion. *The case of Colombia. Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 269, 122317.
11. Markel E., Sims Ch., Burton C. English Policy uncertainty and the optimal investment decisions of second-generation biofuel producers. *Energy Economics*, 2018, vol. 76, pp. 89–100.
 12. Catalán-Martínez D., Domínguez M.E., Serra J.M. Liquid fuels from biomass: An energy self-sustained process integrating H₂ recovery and liquid refining. *Fuel*, 2018, vol. 212, pp. 353–363.
 13. Ramon Filipe Beims, Yulin Hu, Hengfu Shui, Chunbao (Charles) Xu. Hydrothermal liquefaction of biomass to fuels and value-added chemicals: Products applications and challenges to develop large-scale operations. *Biomass and Bioenergy*, 2020, vol. 135, 105510.
 14. Zhengbin He, Jing Qian, Lijie Qu, Zhenyu Wang, Songlin Yi. Simulation of moisture transfer during wood vacuum drying. *Results in Physics*, 2019, vol. 12, pp. 1299–1303.
 15. Shusen Wang, Chun Zou, Chun Lou, Haiping Yang, Mei Mei, Huixiang Jing, Sizhe Cheng. Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace. *Bioresource Technology*, 2020, vol. 310, 123456.
 16. Sheng Qi, Zhihua Wang, Mário Costa, Yong He, Kefa Cen. Ignition and combustion of single pulverized biomass and coal particles in N₂/O₂ and CO₂/O₂ environments. *Fuel*, 2021, vol. 283, 118956.
 17. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Influence of the initial parameters of spray water on its motion through a counter flow of high-temperature gases. *Technical Physics*, 2014, vol. 59 (7), pp. 959–967.
 18. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The motion of a manifold of finely dispersed liquid droplets in the counterflow of high-temperature gases. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40 (6), pp. 499–502.
 19. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical investigation of the influence of convection in a mixture of combustion products on the integral characteristics of the evaporation of a finely atomized water drop. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87 (1), pp. 98–106.
 20. Terekhov V.I., Pakhomov M.A. Heat and mass transfer and hydrodynamics in gas-droplet flows. *Novosibirsk State Technical University*, 2009 vol. 282, pp. 282.
 21. Kuznetsov G.V., Syrodo S.V., Gutareva N.Y. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy*, 2020, vol. 145, pp. 1474–1486.
 22. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Isparenie kapel vody v vysokotemperaturnoy gazovoy srede [Evaporation of water droplets in a high-temperature gas environment]. *Institute of Heat and Mass Transfer. A.V. Lykov NAS of Belarus*, 2019, vol. 89 (1), pp. 133–142.
 23. Kuznetsov G.V., Syrodo S.V., Gutareva N.Y., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh.A. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer. *Fuel*, 2019, vol. 252, pp. 19–36.
 24. Kuznetsov G.V., Syrodo S.V., Malyshev D.Yu., Gutareva N.Yu., Nigay N.A. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage. *Applied Thermal Engineering*, 2020, vol. 170, 115034.
 25. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodo S.V., Gutareva N.Y. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 106, pp. 561–569.
 26. Salomatov V., Kuznetsov G., Syrodo S., Gutareva N. Mathematical and physical modeling of the coal-water coal–water fuel particle ignition with a liquid film on the surface. *Energy Reports*, 2020, vol. 6, pp. 628–643.
 27. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodo S.V., Gutareva N. Yu. Conditions of the water–coal fuel drop dispersion at their ignition in the conditions of high temperature heating. *Combustion science and technology*, 2019, vol. 191, pp. 2162–2184.
 28. Malyshev D.Yu., Syrodo S.V., Kostoreva J.A. Co-ignition of coal-water suspension and woody biomass. *Industrial energy*, 2020, vol. 5, pp. 44–49.
 29. Syrodo S.V., Kostoreva J.A., Kostoreva A.A., Asadullina L.I. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces. *Journal of the Energy Institute*, 2020, vol. 93 (2), pp. 443–449.
 30. Mann H.B., Whitney D.R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 1947, vol. 18, pp. 50–60.
 31. Kuznetsov G.V., Yankovsky S.A., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V., Cherednik I.V. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood. *Energy*, 2020, vol. 194, 116896.

Received: 26 October 2020.

Information about the authors

Zhanna A. Kostoreva, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry Yu. Malyshev, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Semen V. Syrodo, Cand. Sc, researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.