

УДК 662.71

ЗАЖИГАНИЕ ЧАСТИЦ ДРЕВЕСНОЙ БИОМАССЫ В УСЛОВИЯХ СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОМ НАГРЕВЕ

Сыродой Семен Владимирович¹,
ssyrodoy@yandex.ru

Мальшев Дмитрий Юрьевич¹,
dmitry.mlv@gmail.com

Косторева Жанна Андреевна¹,
zhanna.kostoreva@yandex.ru

Косторева Анастасия Андреевна²,
nastia.kostoreva@yandex.ru

Омаров Азимхан Адилханович¹,
aao35@tpu.ru

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

² ОА ТомскРТС,
Россия, 634050, г. Томск, пер. Нахановича, 4а.

Актуальность. Несмотря на активное развитие технологий производства электрической энергии по средствам ветро-электрогенераторов и солнечных батарей, к 2100 г. все равно большая часть энергии будет вырабатываться на тепловых электрических станциях, сжигающих органическое топливо. Как правило, тепловые электрические станции в качестве топлива используют уголь (около 40 %). Однако стоит отметить, что в процессе сжигания угля в топках паровых и водогрейных котлов интенсивно формируются токсичные оксиды серы и азота. В связи с этим многими учёными мира, работающими в области энергетики, ведутся работы по созданию новых инновационных технологий по эколого- и энергоэффективному производству тепловой и электрической энергии. К последним относятся технологии сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов тепловых электрических станций. Использование древесной биомассы позволяет существенно снизить экологическую нагрузку тепловых электрических станций на атмосферу. Однако до настоящего времени еще не создано технологий, позволяющих сжигать древесину с высокой энергоэффективностью. Последнее обусловлено высокой влагонасыщенностью древесной биомассы в ее исходном состоянии.

Цель: экспериментальное установление основных этапов и выделение комплекса физико-химических процессов, протекающих совместно в период воспламенения частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве.

Объект: сухая и насыщенная влагой древесина двух видов (сосна и кедр). Относительная влажность древесины, из которой выполнены частицы (с характерным размером 4 мм), варьировалась от 6 (относительно сухая биомасса) до 42 % (влагонасыщенная древесина).

Метод. Для установления основных характеристик процесса воспламенения частицы древесины в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве разработан специальный экспериментальный стенд, представляющий реакционную трубу с теплоизолированными радиопрозрачными стенками, сквозь которую продувался высокотемпературный окислитель (кислород воздуха). Частица древесины устанавливалась на оси трубы так, чтобы попадать в фокус излучателя. Все процессы регистрировались высокоскоростной видеокамерой.

Результаты. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов зажигания сухих и влажных частиц древесной биомассы в среде нагретого до высоких температур воздуха в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагревов, выполненных с целью обоснования ресурсоэффективности использования в теплоэнергетике древесной биомассы (как базового топлива паровых и водогрейных котлов). Установлено существенное влияние вида древесины на времена задержки зажигания (t_{ign}). Также показано достаточно значимое влияние условий нагрева на процессы воспламенения. Так, микроволновое воздействие приводит к ускорению процесса зажигания частиц древесной биомассы. При этом показано, что при воспламенении влажных частиц древесины эффект от воздействия СВЧ-излучения (ускорения зажигания) более значителен по сравнению с процессом зажигания сухих древесных частиц. Также установлено, что влажность (φ) древесной биомассы существенно влияет на значения времен задержки зажигания (увеличение φ приводит к росту значения t_{ign}). Установленные в проведенных экспериментах закономерности иллюстрируют перспективности использования в теплоэнергетике древесной биомассы (в том числе и влагонасыщенной) как основного топлива.

Ключевые слова:

Древесная биомасса, инициация горения, время термической подготовки, индукция, СВЧ-нагрев.

Введение

Глобальный переход от традиционной (угольной, газовой и атомной) энергетики к нетрадиционным

возобновляемым источникам энергии (ветрогенераторы и солнечные электростанции), проводимый в Европейском союзе в последние десятилетия (около

30 лет) [1], показал, что выбранная ЕС программа развития энергетического сектора ошибочна. Последнее обусловлено отсутствием в настоящее время мощных накопителей электрической энергии [2, 3]. В результате возможность использования вырабатываемой ветрогенераторами и солнечными электростанциями энергии существенно ограничена. Это связано с тем, что до настоящего времени не создано эффективных систем хранения электрической энергии [4, 5]. Поэтому вывод из эксплуатации угольных и атомных электростанций приводит к значительному снижению экономического роста в Западной Европе [6]. В этой связи особую значимость приобретает древесная биомасса, которая является перспективным возобновляемым (в относительно короткий период времени) энергоносителем. При этом в качестве топлива могут использоваться как типичные отходы лесоперерабатывающего комплекса (опилки) или сельского хозяйства (солома, скорлупа, навоз и др.) [7, 8], так и специально выращенная «энергетическая» древесина [9]. При сжигании древесной биомассы образуется диоксид углерода, но он не нарушает баланса диоксида углерода в атмосфере [10]. Также по результатам экспериментов [11, 12] установлено, что при горении древесины образуется значительно меньше оксидов азота и серы по сравнению с горением угля [13–15].

Но к настоящему времени древесная биомасса достаточно мало используется в тепло- и электрогенерации. Последнее связано с тем, что разработка технологии эффективного сжигания биомассы в топках паровых и водогрейных котлов достаточно сложная задача, решение которой в общем виде пока не получено. Так, например, доля котельного оборудования, сжигающего биомассу (в том числе и как добавку к угля), в мире не превышает 10 % [16]. Это обусловлено в первую очередь высокой влагонасыщенностью древесины в ее исходном (после валки дерева) состоянии [17]. При этом известно [17], что сушка любого топлива и древесной самый энергозатратный процесс на тепловых электрических станциях (ТЭС).

Кроме этого, процедуры влагоудаления проводятся, как правило, в объемных хранилищах силосного типа [18]. Последнее существенно увеличивает капитальные затраты (на металлоконструкции непосредственно самого бункера и здания бункерного отделения ТЭС) при проектировании и строительстве ТЭС. При этом по результатам экспериментов [19] установлено, что внутрипоровая влага существенно тормозит процесс термической подготовки и зажигания частиц древесины и, соответственно, увеличивает механический недожог топлива. В этих условиях можно сказать, что проведение процедуры влагоудаления приемлемо проводить непосредственно в топочном устройстве при высокотемпературном нагреве потока частиц влажной древесной биомассы. В первую очередь для этого необходимо организовать в топочном пространстве вихревые зоны постоянной рециркуляции топливного факела по аналогии с топками конструкции Шершнева (рис. 1) [20]. Также следует отметить, что одним из возможных вариантов улуч-

шения характеристик (уменьшение характерных времен процесса) зажигания и горения является сжигание топлива в условиях воздействия на факел топлива физических полей: электромагнитное [21, 22], заряженных частиц [23] или звуковое [24].

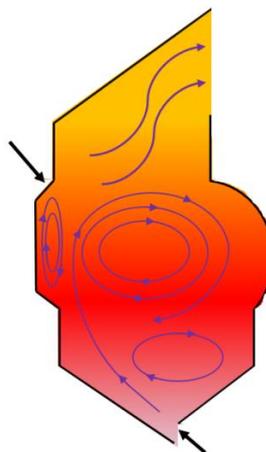


Рис. 1. Схема типичной топки Шершнева для сжигания влагонасыщенных топлив

Fig. 1. Scheme of a typical Shershnev furnace for burning moisture-saturated fuels

Наиболее перспективным из таковых считается (по мнению экспертов [25]) технология сжигания высоковлажного и низкосортного топлива (к которым относится древесная биомасса) в условиях микроволнового воздействия. В результате добавления СВЧ-излучения на слой влагонасыщенного топлива в условиях интенсивного радиационно-конвективного воздействия существенно ускоряется процесс испарения воды. В результате стадия сушки (по терминологии [26]) топливной частицы существенно сокращается, и, соответственно, весь процесс термической подготовки интенсифицируется. Но до настоящего времени систематических экспериментальных и теоретических исследований влияния микроволнового воздействия при воспламенении частицы влажной древесной биомассы практически не проводилось. Поэтому целесообразны исследования с целью сопоставления в условиях такого воздействия характеристик зажигания частиц сухой и влажной древесины. По этой причине целью работы является установление по результатам экспериментов основных закономерностей процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве.

Методика экспериментальных исследований

В экспериментах использовались кубические частицы (с характерным размером 4 мм) древесины (на основе кедра и сосны), вырезанные из сухого монолитного фрагмента высокоточным резакром. Погрешности определения геометрических размеров образца топлива составляли в проведенных экспериментах не более 0,1 мм. Влажность сухих частиц древесины составляла 6–7 %, увлажненных – 40–42 %. Последние значения влажности типичны для свежесрезанной

древесины [27]. На первом этапе проведения и процедуры подготовки экспериментального материала фрагмент древесины больших размеров, из которого приготавливались частицы топлива, высушивался в сушильном шкафу при температуре 100 °С до влажности $\varphi=6-7\%$. Далее проводилось контрольное взвешивание. На втором этапе при помощи лазерного станка вырезались частицы в форме куба с характерным размером грани $\delta=4$ мм. После этого частицы древесины взвешивались. На третьем этапе частицы древесной биомассы выдерживались в дистиллированной воде в течение 2–3 часов. По истечении этого периода частицы взвешивались. Если влажность древесной биомассы была ниже контрольной (в пределах отклонения $\Delta \leq 5\%$), то частицы выдерживались в воде дольше. Если выполнялось условие, что влажность биомассы бы-

ла больше, то частицы дополнительно высушивались. Относительная влажность влагонасыщенного топлива, которая высчитывалась по формуле:

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

m_k – масса насыщенной влагой частицы, m_0 – начальная масса частицы, составляла $\varphi=40-42\%$. Для установления достоверных значений времен задержки зажигания число экспериментов составляло не менее 15 в идентичных условиях нагрева. Обработка результатов проводилась с использованием современного аппарата статистической обработки результатов эксперимента. Значение случайной погрешности составляло менее 16%. Обработка полученных результатов осуществлялась по аналогии с [28].

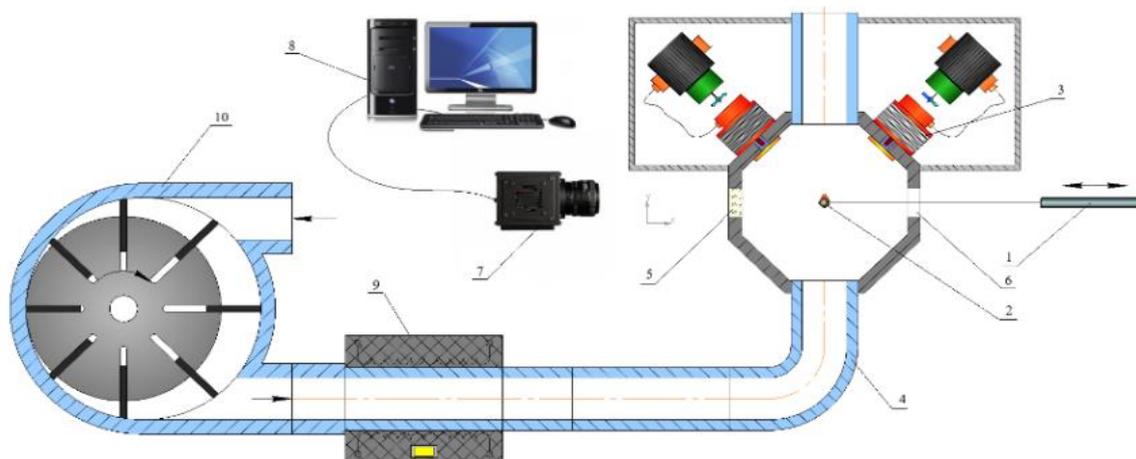


Рис. 2. Схема экспериментальной установки радиационно-конвективно-микроволнового нагрева: 1 – штатив; 2 – древесная частица; 3 – источник микроволнового излучения; 4 – прозрачный цилиндр; 5 – отверстие на задней стенке корпуса камеры микроволновой печи для видеосъемки; 6 – отверстие для ввода частицы древесины; 7 – высокоскоростная видеокамера; 8 – персональный компьютер; 9 – проточный нагреватель; 10 – нагнетатель

Fig. 2. Scheme of the experimental setup for convective microwave heating: 1 – tripod; 2 – wood particle; 3 – source of microwave radiation; 4 – transparent cylinder; 5 – hole on the rear wall of the microwave oven chamber for video recording; 6 – hole for introducing wood particles; 7 – high-speed video camera; 8 – personal computer; 9 – flow heater; 10 – supercharger

Экспериментальная установка представляла собой проточную реакционную камеру цилиндрической формы (рис. 2), расположенную в теплоизолированном кожухе. Через эту камеру продувался высокотемпературный окислитель (воздух). Температура последнего варьировалась в диапазоне от 713 до 783 К. В верхней полусфере камеры монтировались четыре магнетрона так, чтобы топливная частица попадала в фокус излучения магнетронов. Отвод теплоты от магнетронов осуществлялся через радиатор воздушного охлаждения. Топливная частица при помощи дистанционно-управляемого координатного устройства помещалась в камеру сгорания. Все процессы термической подготовки, зажигания и горения регистрировались высокоскоростной видеокамерой.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 3, 4 приведены кадры типичной видеосъемки, демонстрирующие процесс воспламенения

частицы древесины (не насыщенной влагой – рис. 3; с влажностью 47% – рис. 4) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве. Анализ кадров показывает, что процесс термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий. При попадании в высокотемпературную среду и СВЧ-поле (стоячая волна) топливная частица нагревается за счет конвекции и излучения, а также вследствие поглощения СВЧ-излучения. Такое сложное тепловое воздействие инициирует интенсивное испарение внутриводной и адсорбционно-связанной влаги. Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению основных компонентов биомассы. Последнее характеризуется обугливанием поверхности частицы (рис. 3, 4 столбец II, характерное потемнение поверхности биомассы).

При этом можно отметить, что размер частиц несколько уменьшается (рис. 5). Детальный (при боль-

шом увеличении) анализ кадров показал, что размеры частицы в среднем уменьшаются на 13 %. Скорее всего, это связано с термической деструкцией основного слоя топлива, приводящей к формированию высокопористого угольного каркаса с низким коэффициентом ударной вязкости. Как показано в [28], пары воды и газообразные продукты термодеструкции основных компонентов биомассы фильтруются сквозь пористый угольный каркас и вступают в хи-

мическую реакцию с углеродом. В результате внутри частицы формируется газообразные продукты реагирования. Образующаяся во внутрипористой структуре парогазовая смесь приводит к росту внутреннего давления в частице (как показано по результатам математического моделирования [28]) и, соответственно, к диспергированию приповерхностного слоя топлива, и уносу его части вследствие аэродинамического воздействия внешним потоком.

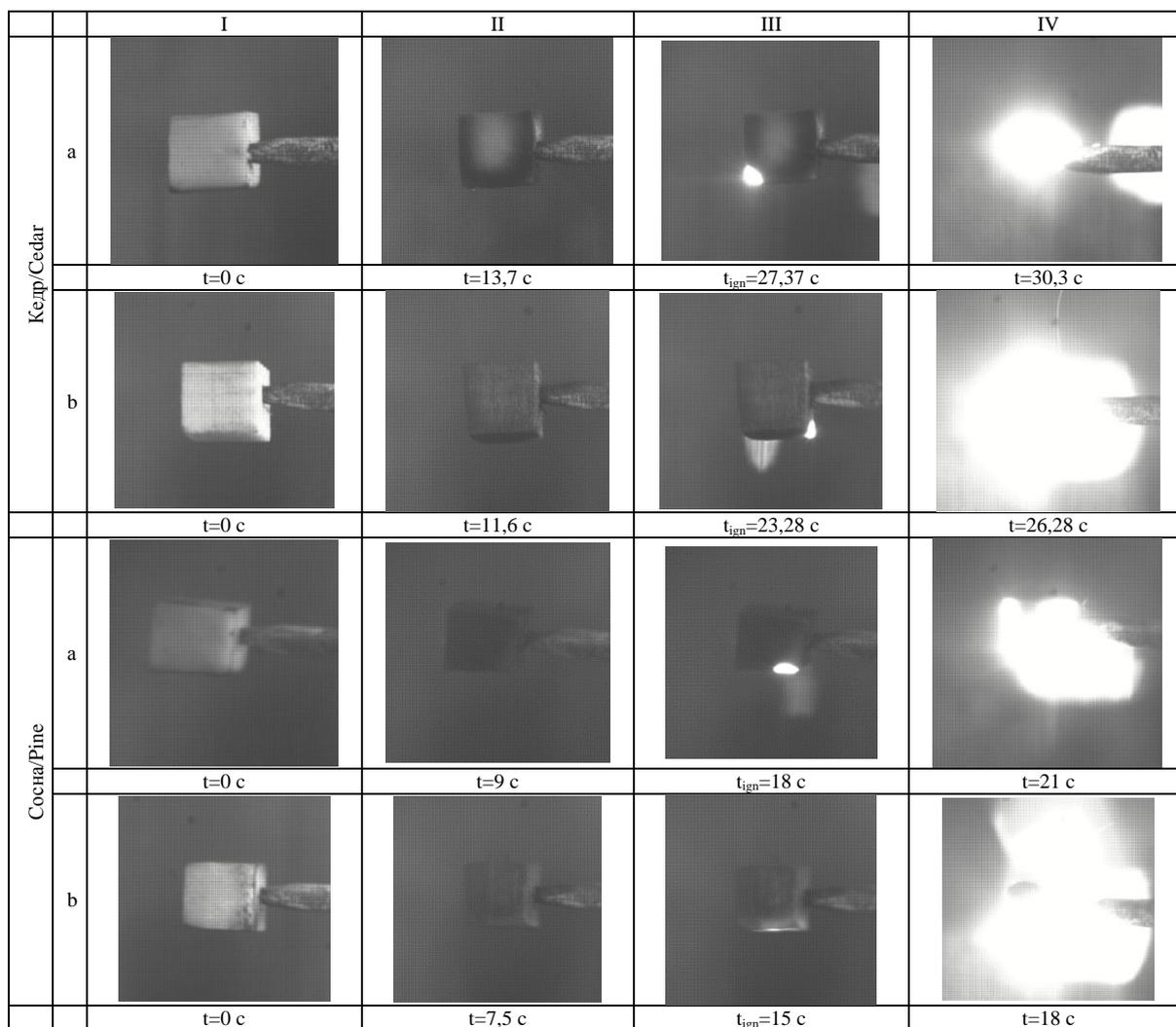


Рис. 3. Типичные кадры процесса воспламенения сухих частиц древесной биомассы при температуре внешней среды $T_g=753\text{ K}$ (a) в условиях радиационно-конвективного нагрева; b) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве)

Fig. 3. Typical shots of ignition of dry particles of woody biomass at ambient temperature $T_g=753\text{ K}$ (a) under conditions of radiative-convective heating; b) under conditions of microwave exposure at high-temperature radiation-convective heating)

Летучие продукты пиролиза совместно с водяными парами вдуваются во внешнюю среду, где перемешиваются с окислителем и вступают в термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха. В результате происходит воспламенение частицы топлива (рис. 3, 4, III). Формируется сфера пламени, которая по своим размерам, как правило, превышает размер частицы (рис. 3, 4, IV).

На рис. 6 приведены зависимости времен задержки зажигания сухих частиц древесной биомассы (сосны и кедра) в условиях относительно низких темпера-

тур внешней среды при радиационно-конвективном и радиационно-конвективно-микроволновом нагревах.

На основании анализа рис. 6 можно сделать вывод, что микроволновое воздействие приводит к достаточно заметному ускорению процесса воспламенения частиц древесной биомассы в диапазоне температур среды от 713 до 783 K. В области относительно низких температур (от 713 до 753 K) воздействие СВЧ-излучения приводит к росту скорости зажигания в среднем на 12 %.

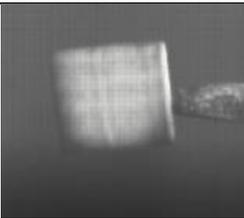
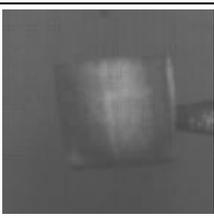
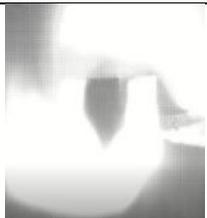
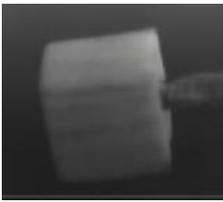
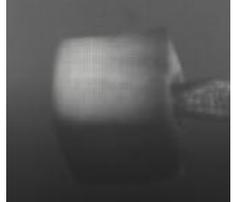
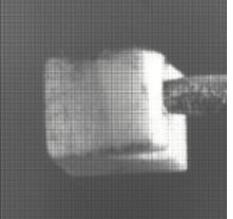
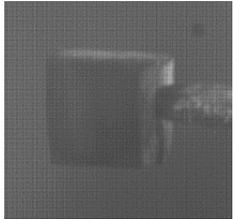
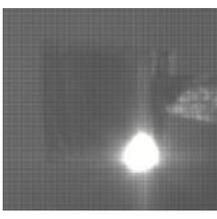
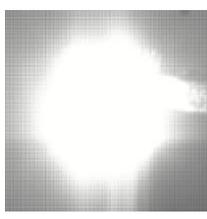
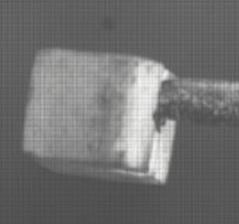
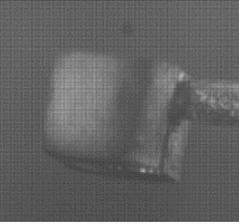
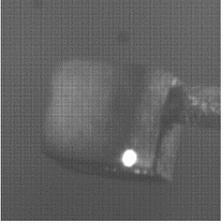
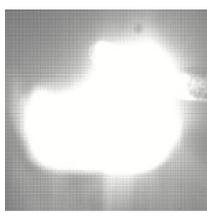
		I	II	III	IV
Кедр/Cedar	a				
		t=0 с	t=11,4 с	t _{ign} =22,8 с	t=27,8 с
Кедр/Cedar	b				
		t=0 с	t=10,2 с	t _{ign} =20,37 с	t=25,37 с
Сосна/Pine	a				
		t=0 с	t=14,8 с	t _{ign} =29,6 с	t=34,6 с
Сосна/Pine	b				
		t=0 с	t=13,85 с	t _{ign} =27,7 с	t=32,7 с

Рис. 4. Типичные кадры процесса воспламенения влагонасыщенных частиц древесной биомассы при температуре внешней среды $T_g=753\text{ K}$ (a) в условиях радиационно-конвективного нагрева; б) в условиях СВЧ воздействия при высокотемпературном радиационно-конвективном нагреве)

Fig. 4. Typical frames of ignition of moisture-saturated particles of woody biomass at an ambient temperature $T_g=753\text{ K}$ (a) under conditions of radiative-convective heating; б) under conditions of microwave exposure at high-temperature radiation-convective heating)

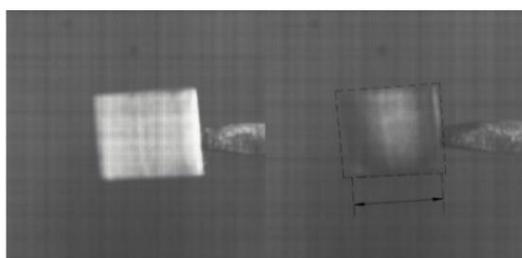


Рис. 5. Изменение размера топлива в процессе пиролиза древесной частицы

Fig. 5. Changing the size of the fuel during the pyrolysis of a wood particle

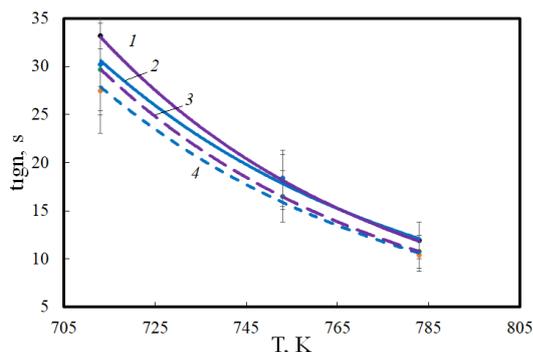


Рис. 6. Зависимости времен задержки зажигания сухих древесных частиц от температуры внешней среды: 1, 3 – частицы кедрa; 2, 4 – частицы сосны; 1, 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3, 4 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев

Fig. 6. Dependences of ignition delay times of dry wood particles on ambient temperature: 1, 3 – cedar particles; 2, 4 – pine particles; 1, 2 – radiative-convective heating; 3, 4 – radiation-convective-microwave heating

На рис. 7 приведены зависимости времен задержки зажигания влагонасыщенных частиц древесины в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагревов. Анализ результатов, приведенных на рис. 6, 7, показал, что температуры окислительной среды оказывает меньшее влияние на времена задержки зажигания влагонасыщенной древесины по сравнению с сухой. Так, для сухих частиц древесины при увеличении T_g с 713 до 785 К времена задержки зажигания уменьшались практически в 3 раза. Для влажных частиц в том же температурном диапазоне снижение происходило лишь в 1,8 раз. Но при этом влажные древесные частицы под воздействием СВЧ-излучения закипаются в среднем на 18 % быстрее по сравнению с условиями воздействия радиационно-конвективного нагрева. Сравнительный анализ рис. 6, 7 показывает, что наибольший эффект от микроволнового воздействия достигается при зажигании влагонасыщенных частиц древесной биомассы.

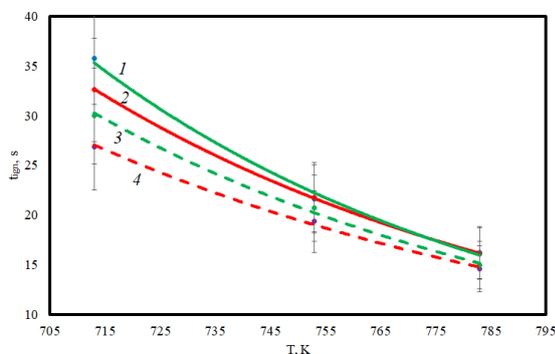


Рис. 7. Зависимости времен задержки зажигания влажных древесных частиц от температуры внешней среды: 1, 3 – частицы кедр; 2, 4 – частицы сосны; 1, 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3, 4 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев;

Fig. 7. Dependences of ignition delay times of wet wood particles on ambient temperature: 1, 3 – cedar particles; 2, 4 – pine particles; 1, 2 – radiative-convective heating; 3, 4 – radiation-convective-microwave heating;

Обоснование применения СВЧ-нагрева в технологии топливосжигания

Одним из основных преимуществ использования СВЧ-энергии для предварительной термической подготовки топлива являются также низкие затраты энергии. Это, бесспорно, делает технологию СВЧ-сушки востребованной для использования на тепловых электрических станциях. Микроволновая установка, имеющая небольшие размеры, является удобной для использования ее на районных или местных котельных [29]. Важнейшим преимуществом микроволнового воздействия является способность электромагнитного поля проникать в материал на значительную глубину, создавая объемное распределение источников тепла, без необходимости присутствия внешнего нагрева. СВЧ воздействие является свободно контролируемым и практически безинерционным процессом, что дает возможность мгновенно опти-

мально контролировать и управлять процессом термической подготовки. Также одним из важнейших преимуществ СВЧ-излучения является его избирательный характер, поэтому отдельные компоненты многокомпонентного материала нагреваются по-разному, в зависимости от их коэффициента поглощения. Это свойство широко используется при сушке материалов [30]. В пористых материалах в процессе микроволновой сушки влага непрерывно движется от внутренних слоев к поверхности материала и испаряется с поверхности, а образующийся пар диффундирует в окружающую среду. Применение СВЧ-излучения во многих случаях повышает экономичность процесса влагоудаления. СВЧ-установки с общим КПД использования электроэнергии, достигающим 85 % за счет отсутствия промежуточных носителей тепла, значительно улучшают процессы зажигания и горения частиц твердых топлив [31]. В [32] приведены экономические показатели замены технологии конвективной сушки бурого угля на технологию влагоудаления по средствам микроволнового нагрева.

Таблица. Показатели экономической эффективности сушки бурого угля на микроволновой установке [32]

Table. Indicators of economic efficiency of drying brown coal at the microwave unit [32]

Показатель Index	Единица измерения Unit	Величина Value
Расход топлива Fuel consumption	кг/с/kg/s	0,27
Капитальные затраты Capital expenditures	р./rub.	180508
Выгода/Profit		862,7
Период окупаемости Payback	месяц/month	≥12

Заключение

Результаты экспериментов показали, что дополнительное СВЧ воздействие приводит к ускорению и стабилизации всего комплекса процессов воспламенения и горения частиц древесного биотоплива. При этом показано, что наибольший синергетический эффект от использования СВЧ-подсветки топлива в процессе горения достигается в условиях низкотемпературного нагрева. Соответственно, можно сказать, что использование микроволновой энергии в технологиях топливосжигания позволяет разработать топочные устройства сжигающих топлива при температурах внешней среды, значение которых ниже уровня образования оксидов серы и азота.

По результатам проведенных экспериментов также установлено, что микроволновое воздействие наиболее эффективно при сжигании влагонасыщенных топлив. Последнее обусловлено тем, что внутрипоровая вода наиболее интенсивно поглощает микроволновое излучение. В результате можно сказать, что технология микроволновой подсветки топливного факела позволяет обеспечить стабильное эколого- и энергоэффективное сжигание древесины.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-10015-П) <https://rscf.ru/project/21-79-03032/>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fouquet R., Hippe R. Twin transitions of decarbonisation and digitalisation: A historical perspective on energy and information in European economies // *Energy Research & Social Science*. – 2022. – V. 91. – 102736.
2. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration / A. Alem Kebede, Th. Kalogiannis, J. van Mierlo, M. Berecibar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2022. – V. 159. – 112213.
3. A review on energy storage devices based on rylene imide dyes: Synthesis, applications and challenges / M.R. Biradar, S.V. Bhosale, P.P. Morajakar, Sh.V. Bhosale // *Fuel*. – 2022. – V. 310. – 122487.
4. Груздев А.И. Состояние, проблемы и направления развития современных накопителей электрической энергии // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2008. – № 7. – С. 116–124.
5. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems / Liangzhong Yao, Bo Yang, Hongfen Cui, Jun Zhuang, Jilei Ye, Jinhua Xue // *J. Mod. Power Syst // Clean Energy*. – 2016. – V. 4 (4). – P. 519–528.
6. Perdana S., Vielle M., Schenkery M. European Economic impacts of cutting energy imports from Russia: A computable general equilibrium analysis // *Energy Strategy Reviews*. – 2022. – V. 44. – 101006.
7. Wood burning: a major source of volatile organic compounds during winter time in the Paris region / B. Languille, V. Gros, J.-E. Petit, C. Honoré, A. Baudic, O. Perrussel, G. Foret, V. Michoud, F. Truong, N. Bonnaire, R. Sarda-Estève, M. Delmotte, A. Feron, F. Maisonneuve, C. Gaimoz, P. Formenti, S. Kotthaus, M. Haeffelin, O. Favez // *Science of the Total Environment*. – 2020. – V. 711. – 135055.
8. Biomass transport for energy: cost, energy and CO2 performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland / V. Schnorf, E. Trutnevtye, G. Bowman, V. Burg // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – V. 293. – 125971.
9. Simonsen M., Kjønaas O.J., Aal C. Substitution of fossil-energy intensive building materials by wood products – does it matter? A case study from Western Norway // *Journal of Cleaner Production*. – 2023. – V. 383. – 134941.
10. Increasing extracellular cellulase activity of the recombinant *Saccharomyces cerevisiae* by engineering cell wall-related proteins for improved consolidated processing of carbon neutral lignocellulosic biomass / Jie Li, Yu Zeng, Wei-Bin Wang, Qing-Qing Wan, Chen-Guang Liu, Riaan den Haan, Willem H van Zyl, Xin-Qing Zhao // *Bioresource Technology*. – 2022. – V. 365. – 128132.
11. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgwater, M.X. Fang // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – 1024.
12. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y.A. Levendis // *Fuel*. – 2018. – V. 211. – P. 363–374.
13. Yilgin M., Pehlivan D.D. Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends // *Applied Energy*. – 2009. – V. 86. – P. 1179.
14. Influence of phosphorus based additives on nitrogen and sulfur pollutants emissions during densified biochar combustion / Qian Wang, Qiankun Cao, Rui Wang, Peifu Wang, Yanhua Zhao, Shijie Li, Feifei Han // *Energy*. – 2023. – V. 275. – 127442.
15. Haykiri-Acma H., Yaman S. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass // *Fuel Processing Technology*. – 2008. – V. 89. – P. 176–182.
16. Haykiri-Acma H., Yaman S. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/ biomass blends: a Turkish case study // *Waste Manag.* – 2008. – V. 28. – P. 2077–2084.
17. Левин Э.Д., Репях С.М. Переработка древесной зелени. – М.: Изд-во «Наука», 1984. – 120 с.
18. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1990. – 336 с.
19. Косторева Ж.А., Малышев Д.Ю., Сыродой С.В. Определение условий и характеристик зажигания частиц влажной древесины для повышения ресурсоэффективности теплоэнергетики // *Известия Томского политехнического университета Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 97–105.
20. Финкер Ф.З., Капица Д.В., Кубышкин И.Б. От вихревой топки до ВИР-сжигания // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*. – 2011. – № 1. – С. 309–317.
21. Математическое моделирование распространения электромагнитного импульса в твердотопливной энергетической установке / А.С. Воронцов, М.Б. Марков, Ю.М. Милёхин, Д.Н. Садовничий. – М.: Федеральный центр двойных технологий «Союз», Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2010. – С. 1–17.
22. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. – М.: Изд-во «Наука», 1953. – 232 с.
23. Милёхин Ю.М., Садовничий Д.Н., Гусев С.А. Электризация твердотопливных энергетических установок при воздействии ионизирующего излучения // *Сб. трудов «Физика экстремальных состояний вещества-2006»* / под ред. акад. В.Е. Фортова. – Черноголовка: Институт проблем химической физики РАН, 2006. – С. 163–164.
24. Гареев Ф.Х. Проблемы и перспективы СВЧ-сушки древесины // *Лесная промышленность*. – 2004. – Т. 14. – № 1. – С. 50–53.
25. Шубин Г.С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1973. – 248 с.
26. Галкин В.П. Древесиноведческие аспекты инновационной технологии сушки древесины: монография. – М.: Изд-во ГОУ ВПО «МГУЛ», 2010. – 238 с.
27. Ignition and combustion characteristics of coal - water fuels based on coal & semi-coke / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov, D.Y. Malyshev, Z.A. Kostoreva, M.V. Purin, S.A. Yankovsky // *Combustion and Flame*. – 2022. – V. 246. – 112430.
28. A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible materials / G.V. Kuznetsov, N.A. Nigay, S.V. Syrodoy, N.Yu. Gutareva, D.Yu. Malyshev // *Energy*. – 2022. – V. 239. – 122362.
29. Саломатов В.В., Сладков С.О., Пашенко С.Э. СВЧ-технологии в угольной энергетике // *Инженерно-физический журнал*. – 2012. – Т. 85. – № 3. – С. 535–549.
30. Брандт Л.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Физматгиз, 1963. – 404 с.
31. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. – М.: Изд-во ИЛ, 1960. – 438 с.
32. Хайдурова А.А. Улучшение качественных характеристик твердого топлива воздействием микроволновой энергии при его подготовке к сжиганию: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Улан-Удэ, 2010. – 17 с.

Поступила: 06.04.2023 г.

Прошла рецензирование: 18.04.2023 г.

Информация об авторах

Сыродой С.В., доктор технических наук, доцент Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Малышев Д.Ю., кандидат технических наук, ассистент Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Косторева Ж.А., кандидат технических наук, ассистент Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Косторева А.А., инженер, ОА ТомскРТС.

Омаров А.А., магистрант, Инженерной школы энергетике НОЦ И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета.

УДК 662.71

IGNITION OF WOODEN BIOMASS PARTICLES UNDER MICROWAVE EXPOSURE AT HIGH-TEMPERATURE RADIATION-CONVECTIVE HEATING

Semen V. Syrodoy¹,
ssyrodoy@yandex.ru

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

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

Anastasia A. Kostoreva²,
nastia.kostoreva@yandex.ru

Azimkhan A. Omarov¹,
aao35@tpu.ru

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

² TomskRTS,
4a, Nakhanovich lane, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance. Despite the active development of technologies for the production of electrical energy by means of wind power generators and solar batteries, by 2100, most of the energy will still be generated at thermal power plants that burn fossil fuels. As a rule, thermal power plants use coal as fuel (about 40 %). However, it should be noted that during the combustion of coal in the furnaces of steam and hot water boilers, toxic oxides of sulfur and nitrogen are intensively formed. In this regard, many scientists of the world working in the field of energy are working to create new innovative technologies for the eco- and energy-efficient production of heat and electricity. The latter include technologies for burning woody biomass in the furnaces of steam and hot water boilers of thermal power plants. The use of woody biomass can significantly reduce the environmental impact of thermal power plants on the atmosphere. However, no technology has yet been developed to burn wood with high energy efficiency. The latter is due to the high moisture saturation of woody biomass in its initial state.

The main aim: experimental determination of the main stages and identification of a complex of physicochemical processes occurring together during the ignition of woody biomass particles under microwave exposure under high-temperature radiation-convective heating.

Object: dry and moisture-saturated wood of two types (pine and cedar). The relative humidity of the wood from which the particles were made (with a characteristic size of 4 mm) varied from 6 % (relatively dry biomass) to 42 % (moisture-saturated wood).

Method. To establish the main characteristics of wood particle ignition under microwave exposure under high-temperature radiation-convective heating, a special experimental stand was developed, representing a reaction tube with heat-insulated radio-transparent walls through which a high-temperature oxidizer (air oxygen) was blown. The wood particle was mounted on the axis of the pipe so as to fall into the focus of the emitter. All processes were recorded by a high-speed video camera.

Results. The paper introduces the results of experimental studies of ignition of dry and wet particles of woody biomass in the environment of air heated to high temperatures under conditions of radiation-convective and radiation-convective microwave heating. A significant influence of the type of wood on the ignition delay times (t_{ign}) was established. Rather significant effect of heating conditions on ignition is also shown, since microwave exposure leads to an acceleration of ignition of woody biomass particles. It was shown that during the ignition of wet wood particles, the effect of exposure to microwave radiation (acceleration of ignition) is more significant compared to ignition of dry wood particles. It was also found that the moisture content (φ) of woody biomass significantly affects the ignition delay times (increase in φ leads to growth in the t_{ign} value). The regularities established in the conducted experiments illustrate the prospects of using woody biomass (including moisture-saturated) in thermal power engineering as the main fuel.

Key words:

Woody biomass, combustion initiation, thermal preparation time, induction, microwave heating.

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

REFERENCES

1. Fouquet R., Hippe R. Twin transitions of decarbonisation and digitalisation: A historical perspective on energy and information in European economies. *Energy Research & Social Science*, 2022, vol. 91, 102736 p.
2. Alem Kebede A., Kalogiannis Th., Van Mierlo J., Bercibar M. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, vol. 159, 112213 p.
3. Biradar M.R., Bhosale S.V., Morajakar P.P., Bhosale Sh.V. A review on energy storage devices based on rylene imide dyes: Synthesis, applications and challenges. *Fuel*, 2022, vol. 310, 122487 p.
4. Gruzdev A.I. Status, problems and directions of development of modern electric energy storage devices. *International Scientific Journal «Alternative Energy and Ecology»*, 2008, vol. 7 (63), pp. 116–124. In Rus.
5. Liangzhong Yao, Bo Yang, Hongfen Cui, Jun Zhuang, Jilei Ye, Jinhua Xue. Challenges and progresses of energy storage technology and its application in power systems. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2016, vol. 4 (4), pp. 519–528.

6. Perdana S., Vielle M., Schenckery M. European economic impacts of cutting energy imports from Russia: A computable general equilibrium analysis. *Energy Strategy Reviews*, 2022, vol. 44, 101006.
7. Languille B., Gros V., Petit J.-E., Honoré C., Baudic A., Perrussel O., Foret G., Michoud V., Truong F., Bonnaire N., Sarda-Estève R., Delmotte M., Feron A., Maisonneuve F., Gaimoz C., Formenti P., Kotthaus S., Haeffelin M., Favez O. Wood burning: a major source of volatile organic compounds during wintertime in the Paris region. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 711, 135055.
8. Schnorf V., Trutnevte E., Bowman G., Burg V. Biomass transport for energy: cost, energy and CO₂ performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. *Journal of Cleaner Production*, 2021, vol. 293, 125971.
9. Simonsen M., Kjønaas O.J., Aal C. Substitution of fossil-energy intensive building materials by wood products – does it matter? A case study from Western Norway. *Journal of Cleaner Production*, 2023, vol. 383, 134941.
10. Jie Li, Yu Zeng, Wei-Bin Wang, Qing-Qing Wan, Chen-Guang Liu, Riaan den Haan, Willem H van Zyl, Xin-Qing Zhao. Increasing extracellular cellulase activity of the recombinant *Saccharomyces cerevisiae* by engineering cell wall-related proteins for improved consolidated processing of carbon neutral lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 2022, vol. 365, 128132.
11. Shen D.K., Gu S., Luo K.H., Bridgwater A.V., Fang M.X. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 2009, vol. 88, 1024 p.
12. Rokni E., Ren X., Panahi A., Levendis Y.A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. *Fuel*, 2018, vol. 211, pp. 363–374.
13. Yilgin M., Pehlivan D.D. Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends. *Applied Energy*, 2009, vol. 86, 1179 p.
14. Qian Wang, Qiankun Cao, Rui Wang, Peifu Wang, Yanhua Zhao, Shijie Li, Feifei Han. Influence of phosphorus based additives on nitrogen and sulfur pollutants emissions during densified biochar combustion. *Energy*, 2023, vol. 275, 127442.
15. Haykiri-Acma H., Yaman S. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass. *Fuel Processing Technology*, 2008, vol. 89, pp. 176–182.
16. Haykiri-Acma H., Yaman S. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/biomass blends: a Turkish case study. *Waste Manag.*, 2008, vol. 28, pp. 2077–2084.
17. Levin E.D., Repyakh S.M. *Pererabotka drevesnoy zeleni* [Processing of tree greens]. Moscow, nauka Publ., 1984. 120 p.
18. Shubin G.S. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1990. 336 p.
19. Kostoreva Z.A., Malyshev D.Yu., Syrodoy S.V. Definition of wet wood particles ignition conditions and characteristics to increase the resource efficiency of heat power engineering. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 97–105. In Rus.
20. Finker F.Z., Kapitsa D.V., Kubyskhin I.B. From a firebox to VIR-burning. Scientific and technical statements of SPbSPU. *Science and education*, 2011, vol. 1, pp. 309–317. In Rus.
21. Vorontsov A.S., Markov M.B., Milekhin Yu.M., Sadovnichiy D.N. *Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya elektromagnitnogo impulsa v tverdotoplivnoy ustanovke* [Mathematical modeling of the propagation of an electromagnetic pulse in a solid fuel power plant]. Moscow, M.V. Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS Publ., 2010. pp. 1–17.
22. Lebedev P.D. *Sushka infrakrasnymi luchami* [Drying with infrared rays]. Moscow, Nauka Publ., 1953. 232 p.
23. Milekhin Yu.M., Sadovnichiy D.N., Gusev S.A. Elektrizatsiya tverdotoplivnykh energeticheskikh ustanovok pri vozdeystvii ioniziruyushchego izlucheniya [Electrization of solid fuel power plants under the influence of ionizing radiation]. *Sbornik trudov. Fizika ekstremalnykh sostoyaniy veshchestva-2006* [Proceedings. Physics of extreme states of matter-2006]. Ed. by V.E. Fortov. Chernogolovka, Institute of Problems of Chemical Physics RAS Publ., 2006. pp. 163–164.
24. Gareev F.Kh. Problems and prospects of microwave drying of wood. *Forest industry*, 2004, vol. 14, no. 1, pp. 50–53. In Rus.
25. Shubin G.S. *Fizicheskie osnovy i raschety protsessov sushki drevesiny* [Physical foundations and calculation of wood drying processes]. Moscow, Lesnaya promyshlennost Publ., 1973. 248 p.
26. Galkin V.P. *Drevesinovovedcheskie aspekty innovatsionnyye tekhnologii sushki drevesiny: monografiya* [Wood science aspects of innovative wood drying technology: monograph]. Moscow, GOU VPO «MGUL» Publ., 2010. 238 p.
27. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Salomatov V.V., Malyshev D.Y., Kostoreva Z.A., Purin M.V., Yankovsky S.A. Ignition and combustion characteristics of coal-water fuels based on coal & semi-coke. *Combustion and Flame*, 2022, vol. 246, 112430.
28. Kuznetsov G.V., Nigay N.A., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu., Malyshev D.Yu. A comparative analysis of the characteristics of the water removal processes in preparation for incineration of typical wood waste and forest combustible materials. *Energy*, 2022, vol. 239, 122362.
29. Salomatov V.V., Sladkov S.O., Pashchenko S.E. Microwave technologies in coal energy. *Engineering and Physical Journal*, 2012, vol. 85, no. 3, pp. 535–549. In Rus.
30. Brandt L.A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Investigation of dielectrics at ultrahigh frequencies]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 404 p.
31. Hippel A.R. *Dielektriki i volny* [Dielectrics and waves]. Moscow, IL Publ., 1960. 438 p.
32. Khaidurova A.A. *Uluchshenie kachestvennykh kharakteristik tverdogo topliva vozdeystviem mikrovolnovoy energii pri ego podgotovke k szhiganiyu*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Improving the qualitative characteristics of solid fuel by exposure to microwave energy during its preparation for combustion. Cand. Diss. Abstract]. Ulan-Ude, 2010. 17 p.

Received: 6 April 2023.
Reviewed: 18 April 2023.

Information about the authors

Semen V. Syrodoy, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitry Yu. Malyshev, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Zhanna A. Kostoreva, Cand. Sc., assistant, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasia A. Kostoreva, engineer, TomskRTS.

Azimkhan A. Omarov, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.