

## Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы

Кулагина Людмила Владимировна<sup>1</sup>, Штым Константин Анатольевич<sup>2</sup>, Кириллова Ирина Валерьевна<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,  
Россия, Красноярск, *klvation@gmail.com*

<sup>2</sup> ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,  
Россия, Владивосток

**Аннотация.** Устойчивый тренд последних десятилетий – поиск и внедрение эффективных, рациональных и возобновляемых источников тепловой энергии для снижения загрязнения окружающей среды. Пеллеты из биомассы (отходов древесины и сельского хозяйства) можно использовать в качестве биотоплива, что является эффективным методом получения биотоплива с такими же характеристиками, как древесина. В статье приведены результаты экспериментов по получению пеллет с включением отходов животноводства и предложена математическая модель процесса горения биотоплива, подтверждающие, что добавление в определенных пропорциях к биомассе сырья отходов животноводства – экологичная, ресурсосберегающая и эффективная альтернатива производства традиционного топлива.

**Ключевые слова:** ресурсосбережение, биотопливо, математическая модель, альтернативная энергетика, загрязнение атмосферы

**Цитирование:** Кулагина Л.В. Совершенствование технологии производства тепловой энергии с использованием биомассы / Л.В. Кулагина, К.А. Штым, И.В. Кириллова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 2(26). – С. 104-114. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.010.

**Введение.** В последние десятилетия мировая зависимость от ископаемого топлива стала критической из-за нескольких факторов: непрерывного роста населения, урбанизации, истощения запасов нефти, непрерывного роста цен на нефтепродукты, глобального потепления. Отрасли промышленности, зависящие от невозобновляемого топлива (уголь, природный газ), вызвали резкое увеличение выбросов парниковых газов, что привело к высокому уровню загрязнения окружающей среды [1, 2]. Возобновляемые источники являются самыми быстрорастущими источниками мировой энергии, потребление увеличивается на 3% в год. Известно, что состав и количество отходящих газов напрямую зависит от вида сжигаемого топлива. Сжигание природного газа ведёт к эмиссии в атмосферу  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$ . Использование органического топлива (в первую очередь мазута) является причиной выбросов  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , золы, соединений ванадия, солей натрия и др. Твердое топливо, помимо вышеупомянутых компонентов, способствует накоплению золы, сажи, несгоревших частиц, золошлаковых отходов [3].

Кризисное состояние энергетического и промышленного секторов стимулировало рост использования возобновляемых источников энергии, таких как, солнечная, ветровая и геотермальная энергия, биомасса и сельскохозяйственные отходы. Эти источники доступны везде и хорошо известны как альтернативные источники, эта чистая и неисчерпаемая энергия может уменьшить загрязнение окружающей среды; тем не менее, ее полный потенциал еще не реализован из-за проблем, связанных с обращением, транспортировкой, хранением и сжиганием сырья [2, 4]. Вероятно, энергетические системы в будущем будут базироваться на интеграции как традиционных, так и нетрадиционных источников тепловой и электрической энергии, систем ее транспортировки, накопления и распределения. Экологические требова-

ния современности создают предпосылки для разработки новых экологоэффективных альтернативных видов топлива, а также математических и вычислительных систем для моделирования процессов горения композиционных смесей с учетом разности состава конечных продуктов [5].

Особенности резко континентального климата большей части территории РФ обуславливают значительную составляющую систем теплоснабжения в суммарном потреблении топливно-энергетических ресурсов (около 400 млн. т/год, 45 % от общего расхода). Вследствие этого достижение реальных показателей энергоэффективности в целом по стране невозможно без повышения эффективности одной из наиболее энергозатратных отраслей народного хозяйства – теплоснабжения [2]. В сфере теплоснабжения присутствует сегмент, который зачастую недооценивается – автономные источники тепла (АИТ) мощностью до 1 МВт, к ним можно отнести котлы в домах частного сектора и на объектах малого и среднего бизнеса. В 2022 году Правительство РФ выделило 12,9 млрд. рублей на перевод частных домов в Омске, Красноярске, Новокузнецке и Чите с угля на альтернативное топливо [6], это дает предпосылки для развития предлагаемой технологии.

Одним из направлений повышения эффективности в энергетике является комплексное использование сырья, создание замкнутых газо- и водооборотных систем; разработка принципиально новых и совершенствование действующих процессов производства; переработка и использование энергетических отходов (теплота, зола, шлак, продукты очистки дымовых газов и т.п.). В настоящее время, несмотря на успешный опыт эксплуатации ветроустановок и солнечных панелей в Европе, США и Канаде, нет ясности в стратегии развития энергетики на ближайшие годы. В связи с этим, в настоящее время слабо разработаны теоретические основы процессов производства, зажигания и горения смесевых композиционных топлив, это в основном связано с тем, что древесина является сложным (с химической точки зрения) композиционным материалом, состоящим из целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, пентозанов и других полисахаридов и кислот [7-11].

**Математическое моделирование сжигания биотоплива.** Разработка наиболее эколого- и энергоэффективных составов биотопливных композиций по результатам экспериментальных исследований процессов зажигания и горения существенно затруднена вследствие большого объема возможных вариаций соотношений основных компонентов топлива, условий теплообмена и характерных размеров топливных частиц. Исследователями доказано, что смешивание двух видов сырья биомассы может улучшить характеристики долговечности производимых пеллет [11].

Состав образующихся в результате термического разложения пеллет твердых (кокс) [12], жидких (биомасло и смола) [13] и газообразных (летучие) продуктов [14] зависит от вида древесины и скорости нагрева топлива. Известно [15], что при пиролизе древесины образуется несколько промежуточных продуктов термического разложения различных, как по химическому составу, так и по фазовому состоянию (твердые, жидкие и газообразные). В процессе горения биотоплива последовательность пиролиза описывается как термическое разложение в одну стадию, но с образованием трех компонентов: уголь, смола и газ (рис. 1). Использование этой модели одностадийного пиролиза может быть как адекватной, так и недостаточно обоснованной при прогнозировании процессов зажигания частиц древесной биомассы [11].



Рис. 1. Схема пиролиза древесины с образованием трех продуктов реакции

В исходный момент времени частица древесного топлива вводится в высокотемпературную среду и греется за счет конвекции и излучения. В итоге усиленного нагрева инициируется процесс улетучивания воды. Фронт улетучивания движется от поверхностных слоев в глубинные. В итоге складывается пористый древесный каркас с высочайшим тепловым сопротивлением. Водяные пары, возникающие при испарении, фильтруются через слой сухого горючего, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса.

Прогрев частички древесной породы приводит к тепловому разложению и выходу летучих продуктов, которые вместе с парами воды и продуктами термохимического взаимодействия углерода и водяных паров фильтруются к плоскости частички горючего [12]. В итоге формируется парогазовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температур и концентраций горючего.

Далее представлена математическая модель для крупных частиц биомассы, в которых существует значительный температурный градиент. Модель учитывает конвекцию и диффузию водяного пара, капиллярную конвекцию воды за счет градиента давления и диффузию связанной воды в порах частиц топлива. Частица рассматривается как одномерная, но модель может быть расширена до двух- или трехмерного варианта. Сделаны следующие допущения: частица биомассы состоит из множества компонентов, в том числе твердых, газообразных и жидких, все компоненты находятся в тепловом равновесии; геометрия частицы сведена к одномерной модели; газы внутри пористой структуры частицы подчиняются закону идеального газа; гомогенными газовыми реакциями внутри частицы пренебрегают.

В момент времени  $t$  и в пространственной координате  $r$  частицы биомассы плотность биомассы  $\rho_{bm} = \rho_{bm}(r, t)$  изменяется во времени в процессе термохимического превращения следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_{bm}}{\partial t} = \dot{\omega}_{bm} = -R_m - R_v - R_c,$$

где  $\dot{\omega}_{bm} = -R_m - R_v - R_c$  скорость потери массы частицы за счет сушки ( $R_m$ ), выделения летучих продуктов ( $R_v$ ) и коксования ( $R_c$ ).

В единице частицы топлива объем влаги обозначается  $\rho_m = \rho_m(r, t)$  и изменяется в процессе горения. Если пренебречь конвекцией и диффузией влаги в частице, то изменение  $\rho_m = \rho_m(r, t)$  во времени можно описать:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = -R_m,$$

Изменение массы кокса в частице описывается уравнением ниже, где исходный член  $\dot{\omega}_c$  учитывает образование угля за счет пиролиза и расход кокса за счет окисления и газификации:

$$\frac{\partial \rho_c(r, t)}{\partial t} = \dot{\omega}_c = R_c - R_{CO_2} - R_{CCO_2} - R_{CH_2O},$$

Скорость гетерогенных реакций угля можно представить в следующем виде:

$$R_{ci} = \frac{M_c}{\Omega M_j} S_{char} A_i T \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \rho_j,$$

где  $i$  – номер реакции (между  $R_{CO_2}$ ,  $R_{CCO_2}$  и  $R_{CH_2O}$ ),  $j = O_2, CO_2, H_2O$ ,  $\Omega$  – стехиометрический коэффициент,  $S_{char}$  – удельная внутренняя поверхность ( $m^2/m^3$ );  $M$  – молекулярный вес.

Уравнение сохранения для газообразных веществ:

$$\frac{\partial}{\partial t} = (\varepsilon p_g Y_i) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} (G(r) \varepsilon p_g u_g Y_i) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left( G(r) \varepsilon p_g D_{эфф} \frac{\partial Y_i}{\partial r} \right) + \dot{\omega}_i,$$

$$i = O_2, N_2, CO, C O_2, H_2 O, CH_4, H_2 \text{ и смола,}$$

где  $\varepsilon$  – пористость;  $p_g$  – плотность газа в частице;  $u_g$  – скорость газа в порах частиц;  $Y_i$  – массовая доля частиц газовой фазы  $i$ .

Эффективный коэффициент диффузии газа в порах частиц рассчитывается следующим образом:

$$D_{эфф} = \frac{D_{ab^e}}{\tau} = D_{ab^e^2},$$

где  $\tau$  – кривизна, которую можно описать как  $\tau = 1/\varepsilon$ . Скорость образования газообразных частиц  $i$ ,  $\dot{\omega}_i$ , определяется из подмоделей для сушки, пиролиза и горения/газификации кокса.

Массовая доля газовой фазы равна

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon p_g) + \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} (G(r) \varepsilon p_g u_g) = \dot{\omega}_g = \sum_{i=1}^N \dot{\omega}_i,$$

где  $N$  – число частиц в газе.

Уравнение сохранения энергии основано на предположении о локальном тепловом равновесии для газа, жидкости и твердого тела:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \left( \rho_m C_{p_m} + \rho_{bm} C_{p_{bm}} + \rho_c C_{p_c} + \varepsilon p_g \sum_{i=1}^N Y_i C_{p_i} \right) T \right) +$$

$$+ \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left( G(r) \varepsilon p_g u_g \sum_{i=1}^N Y_i C_{p_i} T \right) = \frac{1}{G(r)} \frac{\partial}{\partial r} \left( G(r) k_{эфф} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{\omega}_{тепл},$$

где  $T$  – температура компонентов частиц при  $(r, t)$ ;  $\dot{\omega}_{тепл}$  – включает эндотермическую теплоту испарения, теплоту пиролиза и теплоту газификации кокса, а также экзотермическую теплоту окисления кокса и изменение явной энтальпии;  $C_p$  – теплоемкость.

Коэффициент эффективной теплопроводности  $k_{эфф}$  представляет собой сумму коэффициентов теплопередачи радиацией  $k_{рад}$  и конвекцией  $k_{конв}$ . Коэффициент кондуктивной теплопередачи является взвешенной по массе суммой влаги ( $k_m$ ), угля ( $k_c$ ), биомассы ( $k_{bm}$ ) и теплопроводности газа ( $k_g$ ).

Эффективный коэффициент проводимости внутри частицы равен

$$k_{эфф} = k_{конв} + k_{рад},$$

$$k_{конв} = \varepsilon k_g + (1 - \varepsilon) \left[ (p_m k_m + p_{bm} k_{bm} + p_c k_c) / (p_m + p_{bm} + p_c) \right],$$

$$k_{рад} = \frac{\varepsilon \sigma T^3 d_{пор}}{\varepsilon},$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon$  – коэффициент излучения;  $d_{пор}$  – диаметр свободного объема внутри частицы.

**Компонентный состав биотоплива.** Биомасса имеет различные преимущества - доступность, низкая стоимость, нейтральная характеристика  $CO_2$  и широкое распространение [2, 16]. Хотя топливо из биомассы используется повсеместно, в странах с низким уровнем дохода оно сжигается напрямую, что представляет непосредственную опасность для здоровья и оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Исходное сырье для производства пеллет: щепка, опилки, низкотоварная древесина, отходы после с/х переработок, (лузга подсолнуха, солома, шелуха зерновых, отходы круп),

опилки, трава и т.д. Использование биомассы в ее естественном состоянии имеет ряд недостатков: низкая плотность, меньшая теплота сгорания на единицу объема, высокая влажность по сравнению с исходным материалом и высокая зольность, особенно в биомассе, содержащей большое количество коры; кроме того, использование требует дополнительных мер из-за высокого потенциала загрязнения [17]. К недостаткам процесса относится сложность увеличения производственных мощностей из-за нехватки сырья. Возможным решением – является добавление в сырье альтернативных высококалорийных отходов (например, кроличьих ферм).

В кроличьем навозе в доступной водорастворимой форме содержатся активные соединения: фосфор (до 1,8%); кальций (до 2,4%); натрий (до 2,2%); калий (порядка 1,1%) и другие, среди которых в зависимости от местности и рациона кормления встречаются цинк, медь, марганец, железо, а также редкоземельные элементы.

Сбор образцов для представленного в работе эксперимента проводился на кролиководческой ферме в городе Назарово (географические координаты: 56°00' ю.ш. и 90°23' в.д.) в следующих условиях: среднегодовая температура на ферме 13-24 °С, месячная относительная влажность 63-79%, включая «зону комфорта» с температурой 19 °С и уровнем влажности от 60 до 65%. В хозяйстве содержались 150 кроликов. Подготовка сырья осуществлялась в период с июля 2021 г. по декабрь 2021 г. Навоз помещали в большие полиэтиленовые пакеты, далее для получения сырья требуемых характеристик использовался ГОСТ Р 54192-2010, Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием [17]. Сущность метода заключается в высушивании образца при температуре  $(105 \pm 2)$  °С в воздушной атмосфере до постоянной массы (рис. 2).

Технология производства уплотненной биомассы в виде пеллет по технологии «Пини Кей» (часто такие брикеты называют евродрова, или евробрикеты.) с включением отходов кроличьих ферм, включала следующие операции: сбор и транспортировка навоза; хранение и сушка; грубое и мелкое измельчение навоза; брикетирование, охлаждение, кондиционирование и упаковка. Топливные брикеты стандарта «Пини Кей» имеют форму неправильного многогранника или цилиндрической формы, с отверстием внутри по всей длине. Отверстие обеспечивает дополнительную тягу внутри брикета, благодаря этому брикеты горят без принудительной вентиляции и могут успешно использоваться в печах с малой тягой, кроме того, значительно увеличивается теплопроводность.

Во всех существующих методах уплотнения биомассы исходным материалом являются твердые частицы. Преимущество «Пини Кей» – отсутствие связующих веществ при производстве пеллет. При добавлении в исходное сырье отходов в объеме 25% и больше пеллеты рассыпались. Прочностные характеристики пеллет связаны с наличием нативного лигнина и гемицеллюлоз как ответственных за развитие межволоконного взаимодействия. Основной температурный переход полимеров связан с появлением сегментальной подвижности, в результате чего полимер переходит из стеклообразного состояния в высокоэластичное.

Данное оборудование может быть использовано для уплотнения смесей различной granulometry, получаемых путем измельчения биомассы хвойных деревьев, тополей, дубов, берез, сорных культур и др. После получения пеллет с включением отходов животноводства образцы сравнивали по следующим показателям качества: влажность, зольность и теплотворная способность (рис. 3).



**Рис. 2.** Высушивание навоза согласно ГОСТ Р 54192-2010.



*а*

*б*

**Рис. 3.** Pellets, изготовленные из типового сырья (*а*) и с добавлением отходов кроличьих ферм (*б*)

Теплотворную способность и зольность pellets определяли с помощью калориметра ИКА С 6000, оснащенного стандартной кислородной бомбой, используемого для твердых и жидких горючих веществ таких как уголь, кокс, нефтяное масло, мазут, топливо из биомассы, а также строительные материалы. Высушенную биомассу анализировали в соответствии с методиками ГОСТ Р 55661-2013 [18] и ГОСТ 147-2013 [19]. Навеску, содержащую биомассу, помещали в бомбу, окруженную водой и находящуюся в калориметрическом сосуде. Калориметрический сосуд с бомбой размещен в теплоизолированной оболочке с комбинированным нагревом/охлаждением (рис. 4).



**Рис. 4.** Процесс испытаний традиционных и полученных в ходе работы pellets с помощью калориметра ИКА С 6000

Определение содержания элементов С, Н, N, O, S реализовано с помощью универсального элементного анализатора Vario MACRO cube, предназначенного для определения макросодержаний элементов в твердых и жидких пробах. Результаты сравнительного анализа пеллет представлены в таблице.

Основными выбросами загрязняющих веществ, возникающими при сжигании твердого биотоплива из опилок, являются оксиды азота  $\text{NO}_x$  [20]. Концентрация оксида азота в выхлопных газах, с одной стороны, оказывает негативное влияние на окружающую среду, а с другой стороны, является показателем интенсивности процесса горения. Наличие оксидов азота в дымовых газах дает информацию о температуре горения, так как они образуются при высоких температурах [21]. Как видно из таблицы, в полученном образце, благодаря технологии подготовки сырья и заданной температуре при производстве пеллет, выбросы  $\text{NO}_x$  отсутствуют, что подтверждает экологичность предлагаемого биотоплива.

Зола является негорючим компонентом биомассы, и чем выше зольность топлива, тем ниже его теплотворная способность. Очевидно, что уменьшение содержания древесных компонентов и увеличение количества биомассы приведет к уменьшению зольности. Низкая зольность ценна, а избыток золы вызывает проблемы при горении, препятствуя проникновению воздуха в печь, тем самым, замедляя скорость горения такого пеллет.

Теплотворная способность является стандартной мерой содержания энергии в топливе, определяется как количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы массы топлива и охлаждении продуктов сгорания до 298 К. Когда скрытая теплота конденсации воды включается в теплотворную способность, ее называют калорийностью. Однако в печах любая влага, содержащаяся в топливе, образующаяся в процессе горения, уносится в виде водяного пара, поэтому эта теплота не учитывается. Результат известен как чистая теплотворная способность или низшая теплота сгорания. Топлива, содержащие углерод с более высокой степенью окисления, будут иметь более низкую теплотворную способность, поскольку для их полного окисления требуется меньше кислорода. Однако, когда топливо содержит такие соединения, как углеводороды, которые имеют более низкую степень окисления, это имеет тенденцию повышать теплотворную способность биомассы. Таким образом, становится очевидным, что элементный состав сырья может играть жизненно важную роль в теплотворной способности биомассы.

**Таблица.** Сравнительный анализ пеллет из разных материалов

Наименование и обозначение показателя	Единица измерения	Результаты испытаний образца (а)	Результаты испытаний образца (б)
Влага общая, $W_t^f$	%	6,1	3,6
Зольность, сухое состояние, $A^d$	%	2,7	2,0
Выход летучих веществ, Сухое беззольное состояние, $V^{daf}$	%	82,7	82,0
Содержание углерода, сухое беззольное состояние, $C^{daf}$	%	52,7	53,2
Содержание водорода, сухое беззольное состояние, $H^{daf}$	%	6,11	6,23
Содержание азота, сухое беззольное состояние, $N^{daf}$	%	0,71	0,00
Содержание серы, сухое состояние,	%	0,00	0,00

$S^d$			
Содержание серы, сухое беззольное состояние, $S^{daf}$	%	0,00	0,00
Содержание кислорода, сухое беззольное состояние, $O^{daf}$	%	40,53	40,57
Высшая теплота сгорания, сухое состояние, $Q_s^d$	ккал/кг	4810	4910
Высшая теплота сгорания, сухое беззольное состояние, $Q_s^{daf}$	ккал/кг	4940	5010
Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, $Q_i^r$	ккал/кг	4210	4400

Сравнивая значения, полученные в результате проведенных экспериментальных испытаний с данными, представленными в научной литературе [20, 21], приходим к выводу, зрелища воздействия на окружающую среду использование пеллет из комбинированного сырья для отопления более выгодно, чем сжигание древесного биотоплива, из-за меньшего количества загрязняющих веществ и более высокой теплотворной способности.

**Заключение.** В статье представлена технология получения биотоплива с добавлением органических компонентов и разработана комплексная модель сжигания биомассы, приведена сравнительная количественная оценка теплопроизводительности и уровня воздействия на окружающую среду традиционных древесных пеллет и пеллет с добавлением отходов животноводческих хозяйств. Результаты, представленные в работе, доказывают, что полученные с включением отходов кроличьих ферм пеллеты могут успешно заменить традиционное биотопливо, благодаря высокой теплотворной способности (продолжительность горения значительно выше простых дров, не дымят при сгорании), снижению загрязнения воздуха и почвы, минимизации затрат при изготовлении.

В условиях нехватки сырья в лесодефицитных районах добавление местных доступных компонентов при производстве биотоплива дает ряд неоспоримых преимуществ: полная утилизация навоза, отсутствие вредных экологических воздействий на всех стадиях утилизации токсичных отходов жизнедеятельности животных и углеродсодержащих отходов и образований, снижение себестоимости производства.

Представленные результаты являются основой для дальнейших разработок в области компьютерного моделирования процессов сжигания топлива с включением отходов животноводства, оптимизации параметров топочного устройства с целью снижения негативного воздействия на окружающую среду и усовершенствования экономических показателей процесса изготовления сырья.

#### Список источников

1. Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier Science, 2010, pp. 63-81.
2. Кулагина Т.А. Теоретические основы защиты окружающей среды: учебн. пособие / Т.А. Кулагина, Л.В. Кулагина. – Красноярск: СФУ, 2017. – 362 с.
3. Bhattacharya S.C., Leon M.A., Rahman M.M. A study on improved biomass briquetting. Energy for sustainable development, 2002, 6(2), pp.106–110.
4. Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P Energy saving technologies and mass – thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry. Journal of Cleaner Production, 2020, v.274, DOI:10.1016/j.clepro.2020.122997.
5. Сыродой С.В. Публичная библиотека в системе непрерывного библиотечно-информационного образования: специальность 01.04.14 «Библиотечковедение, библиографоведение и книговедение» : диссертация

- на соискание ученой степени доктора технических наук / Сыродой Семён Владимирович; Томский политехнический университет. – Томск, 2022. – 403 с.
6. Абрамченко В. В. Частные дома в четырех городах переведут с угля на альтернативное топливо. – URL: [https://t.me/s/government\\_rus/2035](https://t.me/s/government_rus/2035) (дата обращения 12.05.2022).
  7. Corella J, Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. *Fuel Process Technol*, 2005, 86(9), pp.1021-1053.
  8. Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling, *AIChE J* 2006, 52(12), pp. 4258–4272.
  9. Van den Enden PJ, Lora ES. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. *Biomass Bioenergy* 2004, 26(3), pp. 281–287.
  10. Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K, Kucukbayrak S: Fuel briquettes from biomass-lignite blends. *Fuel processing technology*, 2001, 72, pp. 43–50.
  11. Никитин В.М. Химия древесины и целлюлозы / Никитин В.М. // – М.: Лесная промышленность, 1978. – 368 с.
  12. Кузнецов В.Г. Влияние кинетической схемы пиролиза на прогностические оценки характеристик процесса воспламенения частицы древесной биомассы/ Г.В. Кузнецов, С.В. Сыродой// *Физика горения и взрыва*, 2019. – Т.55. – №2. – С. 82-96.
  13. Gorton W.C., Knight J.A Oil from biomass by entrained – flow pyrolysis. *Biotechnol Bioeng Symp*, 1984, v.14, pp.15–20.
  14. Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. Product composition and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. *Ind. Eng. Proc. Des. Dev*, 1985, v.24, pp. 836–844.
  15. Гришин А.М. Сравнительный анализ термокинетических постоянных сушки и пиролиза лесных горючих материалов/ А.М. Гришин, С.П. Синицын, И.В. Акимов// *Физика горения и взрыва*, 1991. – Т.27. – №6. – С.17-23.
  16. Патент на полезную модель № 205015, Устройство для подготовки к сжиганию водотопливной смеси с органическими компонентами: № 2020104971; заявл. 2021.02.25. Публ. и выдача пат. 2023.06.23 / Кулагина Л.В., Енютина Т.А., Кириллова И.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет».
  17. Кулагина Л.В. Повышение экологичности сжигания смесей в топках малого объёма за счёт включения органических компонентов / Л.В. Кулагина, И.В. Кириллова // *E3S Web Conf.* – Vol. 295. – 2021. *International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021)*. – DOI: 10.1051/e3sconf/202129502002.
  18. ГОСТ Р 54192-2010. Биотопливо твердое. Определение содержания влаги высушиванием. Часть 2. Общая влага. Ускоренный метод.
  19. ГОСТ Р 55661-2013 (ИСО 1171:2010). Топливо твердое минеральное. Определение зольности (Издание с Изменением N 1) / ГОСТ Р от 28 октября 2013 г.
  20. Zhou, S. and Zhang, X. Prospect of briquetting biomass fuel by forest residues in Tibet. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2007, vol. 24(1), pp. 170-174.
  21. Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass Bioenergy*, 2006, vol.30, pp.648–654.

**Кулагина Людмила Владимировна** канд. техн. наук, доцент кафедры *Техносферная и экологическая безопасность СФУ*; AuthorID 596975, SPIN-код 1325-9320, ORCID 0000-0003-4406-5060, [klvation@gmail.com](mailto:klvation@gmail.com), г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, д. 26.

**Штым Константин Анатольевич** докт. техн. наук, профессор, директор Департамента энергетических систем Политехнического института (Школы) ДВФУ, AuthorID 483983, SPIN-код 8616-043, [shtym.ka@dvfu.ru](mailto:shtym.ka@dvfu.ru), о. Русский, Кампус ДВФУ, корп. С, уровень 7.

**Кириллова Ирина Валерьевна** аспирант кафедры *Техносферная и экологическая безопасность СФУ*, 20.04.01.01 *Безопасность жизнедеятельности в техносфере*, AuthorID 1029381, SPIN-код 9493-8756, [kirina.24@yandex.ru](mailto:kirina.24@yandex.ru), г. Красноярск, ул. Ак. Киренского, д. 26.

UDC 620.95.001.76

DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.010

## Development the Technology for the Production of Thermal Energy Using Biomass

Liudmila V. Kulagina<sup>1</sup>, Konstantin A. Shtym<sup>2</sup>, Irina V. Kirillova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, *klvation@gmail.com*

<sup>2</sup>Far Eastern Federal University, Russia, Vladivostok, *shtym.ka@dyfu.ru*

**Abstract.** A sustainable trend of recent decades is the search for and implementation of efficient, rational and renewable sources of thermal energy to reduce environmental pollution. Pellets from biomass (waste wood and agriculture) can be used as biofuels, which is an efficient method for obtaining biofuels with the same characteristics as wood. The article presents the results of experiments on obtaining pellets with the inclusion of animal waste and a mathematical model of the biofuel combustion process is proposed, confirming that the addition of animal waste in certain proportions to the biomass of raw materials is an environmentally friendly, resource-saving and efficient alternative to the production of traditional fuel.

**Keywords:** Resource Saving, Biofuel, Mathematical Model, Alternative Energy, Air Pollution

### References

1. Stracher G.B., Anupma P., Sokol E.V. Coal and Peat Fires: A Global Perspective. Elsevier Science, 2010, pp. 63–81.
2. Kulagina T.A. Teoreticheskiye osnovy zashchity okruzhayushchey sredy: uchebn. posobiye [Theoretical foundations of environmental protection: Tutorial. Krasnoyarsk, SibFU, 2017, 362 p.
3. Bhattacharya S.C., Leon M.A., Rahman M.M. A study on improved biomass briquetting. Energy for sustainable development, 2002, 6(2), pp.106–110.
4. Wang R.Q., Jiang L., Wang Y.D., Roskilly A.P. Energy saving technologies and mass – thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry. Journal of Cleaner Production, 2020, v.274, DOI:10.1016/j.clepro.2020.122997.
5. Syrodoi, S.V. Public library in the system of continuous library and information education: specialty 01.04.14 «Library science, bibliography and book science». Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Tomsk Polytechnic University, 2022, 403 p.
6. Abramchenko V. V. Chastnyye doma v chetyrekh gorodakh perevedut s uglya na al'ternativ-noye toplivo [Private houses in four cities will be transferred from coal to alternative fuel]. Available at: [https://t.me/s/government\\_rus/2035](https://t.me/s/government_rus/2035) (access 12.05.2022).
7. Corella J, Sanz A. Modeling circulating fluidized bed biomass gasifiers. A pseudo-rigorous model for stationary state. Fuel Process Technol, 2005, 86(9), pp. 1021-1053.
8. Radmanesh R, Chaouki J, Guy C. Biomass gasification in a bubbling fluidized bed reactor: experiments and modeling, AIChE J 2006, 52(12), pp. 4258–4272.
9. Van den Enden PJ, Lora ES. Design approach for a biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFB. Biomass Bioenergy 2004, 26(3), pp. 281–287.
10. Yaman S, Sahan M, Haykiri-Acma H, Sesen K, Kucukbayrak S: Fuel briquettes from biomass-lignite blends. Fuel processing technology, 2001, 72: pp.43–50.
11. Nikitin V.M. Khimiya drevesiny i tsellyulozy [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 1978, 368 p.
12. Kuznetsov V.G., Syrodoi, S.V. Vliyaniye kineticheskoy skhemy piroliza na prognosticheskiye otsenki kharakteristik protsessy vosplamneniya chastitsy drevesnoy biomassy [Influence of the Pyrolysis Kinetic Scheme on the Predictive Estimates of the Characteristics of the Ignition Process of a Woody Biomass Particle]. Fizika goreniya i vzryva [Physics of combustion and explosion], 2019, v. 55, no. 2, pp. 82–96.
13. Gorton W.C., Knight J.A Oil from biomass by entrained – flow pyrolysis. Biotechnol Bioeng Symp, 1984, v.14, pp.15–20.
14. Nunn T.R., Howard J.B., Longwell J.P., Peters W.A. Product composition and kinetics in the rapid pyrolysis of sweet gum hardwood. Ind. Eng. Proc. Des. Dev, 1985, v.24, pp. 836–844.
15. Grishin A.M., Sinitsyn S.P., Akimov I.V. Sravnitel'nyy analiz termokineticheskikh postoyannykh sushki i piroliza lesnykh goryuchikh materialov [Comparative Analysis of Thermokinetic Constants of Drying and Pyrolysis of Forest Combustible Materials]. Fizika goreniya i vozdeystviya [Physics of Burning and Exposure], 1991, v. 27, no. 6, pp. 17–23.

16. Kulagina L.V., Enyutina T.A., Kirillova I.V. Device for preparation for combustion of a water-fuel mixture with organic components: № 2020104971 Utility Model Patent № 205015
17. Kulagina L.V., Kirillova I.V. Povysheniye ekologichnosti szhiganiya smesey v topkakh malogo ob'yoma za schot vklucheniya organicheskikh komponentov [Improving the environmental friendliness of burning mixtures in small-volume furnaces due to the inclusion of organic components]. International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2021). E3S Web Conf., V. 295, 2021. – DOI: 10.1051/e3sconf/202129502002.
18. GOST R 54192-2010. Biofuels are solid. Determination of moisture content by drying. Part 2. General moisture. accelerated method.
19. GOST R 55661-2013 (ISO 1171:2010). Solid mineral fuel. Determination of ash content (Edition no. 1) / GOST R 28 October 2013.
20. Zhou, S. and Zhang, X. Prospect of briquetting biomass fuel by forest residues in Tibet. Korean Journal of Chemical Engineering, 2007, vol. 24(1), pp. 170-174.
21. Mani, S., Tabil, L.G. and Sokhansanj, S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. Biomass Bioenergy, 2006, vol.30, pp.648–654.

**Kulagina Liudmila Vladimirovna**, PhD (Candidate of Technical Sciences), Assistant Professor of the Chair «Technospheric and Ecological Safety» in SibFU; AuthorID 596975, SPIN-код 1325-9320, ORCID 0000-0003-4406-5060, klvation@gmail.com, 26 Kirenskogo str., Krasnoyarsk, Russia.

**Shtym Konstantin Anatolievich**, PhD (Doctor of Technical Sciences), Full Professor, Head of the Department of Construction Engineering Systems in Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University, AuthorID 483983, SPIN-код 8616-043, shtym.ka@dvfu.ru, Level 7, Building C, FEFU Campus, Russky Island.

**Kirillova Irina Valerievna**, PhD student of the Chair «Technospheric and Ecological Safety» in SibFU, AuthorID 1029381, SPIN-код 9493-8756, kirina.24@yandex.ru, 26 Kirenskogo str., Krasnoyarsk, Russia.

Статья поступила в редакцию 24.04.2022; одобрена после рецензирования 03.06.2022; принята к публикации 15.06.2022.

The article was submitted 04/24/2022; approved after reviewing 06/03/2022; accepted for publication 06/15/2022.