

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

А.П. Бурдуков, В.А. Попов, М.Ю. Чернецкий,
А.А. Дектерев, О.И. Ломовский, А.Л. Бычков

В работе рассматривается механохимическое получение лигноцеллюлозного дисперсного топлива из подходящего сырьевого источника и с использованием подходящего промышленного оборудования, испытание полученных образцов на огневых стендах для определения их пригодности к использованию в качестве экологически чистого топлива, а также представлена математическая модель факельного горения биотоплива.

Ключевые слова: биомасса, горелка, механоактивация, микропомол, моделирование.

Введение

Получение и использование экологически чистого топлива из возобновляемых лигноцеллюлозных источников является важной и актуальной задачей для науки и промышленности [1]. Для большинства регионов мира подобран подходящий вид топлива [2], охарактеризовано лигноцеллюлозное сырьё, включая биомассу произрастающих в регионе растений, невостребованные отходы сельского хозяйства [3], городской мусор [4]. Проиллюстрирована энергетическая и экологическая эффективность внедрения различных видов биотоплива, например биоэтанола, биобутанола, биогаза [5, 6].

Некоторой аналогией жидким альтернативным энергоносителям (биоэтанол, биодизель) являются твёрдые виды топлива из мелкодисперсной лигноцеллюлозной биомассы, как конкурентоспособная замена каменному углю. Непосредственное использование мелкодисперсной биомассы вместо угля имеет значительные перспективы по экологической причине. По сравнению с углем биомасса содержит меньше золы, меньше серы. При этом зола легко удаляется водой. К недостаткам топлива из биомассы можно отнести низкую теплотворную способность (по сравнению с каменным углем) и низкую плотность, следовательно, высокие транспортные затраты.

Описание процесса горения биомассы по сравнению с углем представляет собой более сложную задачу вследствие большого разброса в химических и физических свойствах частиц. В ряде работ рассмотрены составы различных типов биомассы и определены их теплофизические характеристики [7-9]. Предложен ряд моделей, описывающих горе-

ние отдельных частиц биомассы [10] и горение коллектива частиц [11, 12].

С современной точки зрения, процесс горения частицы биомассы состоит из следующих стадий [7]: прогрев, сушка, пиролиз и выделение летучих компонентов, горение летучих компонентов, горение углерода. Каждая из стадий характеризуется собственными временными параметрами, которые сильно зависят от внешних условий и свойств топлива.

Продолжительность каждой стадии сильно зависит от размеров и влажности частиц, природы и содержания летучих компонентов, свойств углерода, образовавшегося после выделения летучих компонентов. Стадии тесно связаны между собой и могут осуществляться одновременно в зависимости от внешних условий и характеристик топлива.

Справедливости ради стоит отметить, что за многолетнюю историю исследования дисперсного твердого топлива решены многие фундаментальные и технические проблемы. Так, развита математическая модель пиролиза биомассы, которая учитывает, что с увеличением температуры и увеличением скорости нагрева происходит уменьшение выхода углерода и уменьшение времени конверсии целлюлозных и древесных частиц [13].

Изучено изменение морфологии при измельчении лигноцеллюлозной биомассы [14]. Показано, что предварительная химическая обработка лигноцеллюлозных материалов приводит к уменьшению их прочности при разрушении [15-16]. Продемонстрированы процессы, протекающие в клеточных стенках при сверхтонком измельчении лигноцеллюлозных материалов [17].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Однако остается ряд нерешенных задач, которые ограничивают использование дисперсного лигноцеллюлозного топлива. В частности, не решены вопросы получения одинакового размера твердых частиц в топливе, что приводит к затруднениям и неравномерностям при сжигании. Кроме того, в литературе отмечается, что сведений о результатах испытаний дисперсного топлива из биоресурсов чрезвычайно мало [7].

Дополнительные сложности представляет учет таких специфических особенностей биомассы, как ее гетерогенный характер и волокнистое строение [18, 19]. Несмотря на все эти сложности, оказывается, что обычно формирующееся при разрушении биомассы распределение и форма частиц приемлемы с точки зрения равномерности распределения частиц в смеси и обеспечения устойчивости горения [20-22].

Таким образом, целью данной работы было механохимическое получение лигноцеллюлозного дисперсного топлива из подходящего сырьевого источника и с использованием подходящего полупромышленного оборудования, испытание полученных образцов на огневых стендах для определения их пригодности к использованию в качестве экологически чистого топлива, разработка мате-

матической модели горения частиц биотоплива.

Материалы и методы

В работе использовалась солома пшеницы, заготовленная в АОЗТ «Дубровское» Кожевниковского района Томской области в сентябре 2012 г в виде рулонов. В декабре 2012 года один рулон массой 150-170 кг был доставлен в ИХТТМ СО РАН, просушен до влажности менее 6 %, подвергнут предварительному измельчению в ножевой мельнице до размеров менее 2 мм и последующей механической активации в центробежно-роликовой мельнице и пневматической мельнице.

Химический состав использованной соломы определялся согласно ранее опубликованной гравиметрической методике [17], основанной на последовательном удалении из биомассы экстрактивных веществ, гемицеллюлоз и лигнина.

Механическая активация биомассы соломы в центробежно-роликовой мельнице ТМ-3 (производства ЗАО «НОВИЦ», г. Новосибирск) проводилась при условиях, позволяющих дозированно подводить к измельчаемому веществу механическое воздействие. Режимы работы оборудования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы работы центробежно-роликовой мельницы ТМ-3 при приготовлении образцов порошкового топлива с различной дисперсностью

Параметры узла подачи сырья		Параметры узла измельчения	
Скорость подачи сырья, кг/ч	Затраты электроэнергии на подачу сырья, кВт/ч	Скорость вращения ротора, об./мин	Затраты электроэнергии на измельчение, кВт/ч
50	0,18	2800	10,5
50	0,18	3150	14,5
50	0,18	3500	18,5

Механическая активация биомассы соломы при помощи пневматической мельницы ПМ-250 проводилась в следующем режиме: производительность 50 кг/час, расход воздуха 20 м³/кг. При этом затраты электроэнергии на создание давления воздушной струи и помол составили 1,2 кВт/час. Гранулометрический состав образцов определялся с использованием набора сит с размерами отверстий 30, 32, 40, 50, 80, 100, 160, 200, 300, 400 и 500 мкм, помещаемого на просеивающую машину «Fritsch Analysette 3 PRO» (Германия). Распределение частиц по размерам во фракциях менее 250 мкм изучалось при помощи метода рассеяния лазерного луча (LDS) на приборе Микросайзер 201 (Санкт-Петербург).

Результаты и обсуждение

Выбор сырья, подходящего для получения образцов порошкового топлива во многом определяется содержанием основных структурных полимеров, в первую очередь лигнина, обладающего повышенной теплотворной способностью. Наиболее широкий список непищевого лигноцеллюлозного сырья, характерного для нашей страны, включает следующие виды, но не ограничиваются ими: стебли кукурузы, кукурузные початки, солома пшеницы, ржи, ячменя, костра льна, стебли сорго, табака, картофеля, хлопчатника, несъедобные части растений, лузга (шелуха) злаков и подсолнечника, многочисленные сорта древесины, водоросли, травы, специальные «энергетические» растения.

В данной работе из всего спектра возобновляемых лигноцеллюлозных ресурсов отобрана солома пшеницы, являющаяся основным отходом выращивания зерна. Этот отход практически не используется в кормлении животных и слабо востребован в других зоотехнических приложениях, например для подстилки для животных в холодных регионах страны.

Как следствие слабого вовлечения соломы в сельскохозяйственный цикл, она в измельчённом виде запахивается в почву при уборке зерновых или накапливается на полях и сжигается. Кроме того, исходя из анализа современной научно-технической литературы, именно солома злаков, в частности пшеницы, является наиболее перспективным сырьём для производства биоэтанола биотехнологическими ферментативными методами.

Для уточнения пригодности выбранной биомассы в качестве мелкодисперсного топлива было определено содержание основных биополимеров, определяющих теплотворную способность (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав соломы пшеницы

Компонент	Содержание компонента, %
Зольность	8,2
Влажность	5,9
Неполярные экстрактивные вещества	0,10
Полярные экстрактивные (водорастворимые) вещества	9,3
Легкогидролизуемые полисахариды (гемицеллюлоза)	33,6
Трудногидролизуемые полисахариды (целлюлоза)	32,9
Лигнин	18,3

Из представленных данных и анализа литературы видно, что по содержанию лигнина выбранное сырьё занимает промежуточное положение среди прочих видов лигноцеллюлозного сырья [23] и с учётом доступности и слабой востребованности является подходящим сырьём для получения мелкодисперсного экологического чистого топлива.

В настоящее время для эффективного измельчения органических, полимерных и биополимерных материалов создан широкий спектр помольного (низкоэнергонапряжённого) и механохимического (высокоэнергонапряжённые механоактиваторы) оборудования

[24]. К таковым относятся дезинтеграторы, дисмембраторы, валковые, планетарные, вибрационные, пневматические мельницы, истиратели и т.д. Часть из них обладает высокой энергонапряжённостью (планетарные активаторы) и пригодна для получения тонкодисперсного порошкообразного продукта из высокотвёрдых материалов, но является аппаратом периодического действия с малой производительностью. Некоторые, например валковые мельницы или истиратели, обладают хорошей производительностью, но пригодны лишь для предварительного измельчения материала и не способны получать продукт с тониной менее 100-200 мкм.

С точки зрения получения мелкодисперсного лигноцеллюлозного топлива, необходимо использовать аппараты, которые, работая в проточном режиме при производительности минимум 50-150 кг/час способны измельчать растительное сырьё до размеров меньше 150-200 мкм. Также, это оборудование должно быть доступным на рынке, ремонтпригодным, легко управляемым и настраиваемым оператором без проведения длительного обучения. Из всего спектра оборудования, имеющегося на данный момент, поставленным условиям наиболее удовлетворяют центробежно-роликовые и пневматические мельницы.

Для сравнения применимости выбранного механохимического оборудования были проведены эксперименты по механической активации предварительно подготовленной (высушенной до влажности менее 6 % и измельчённой на низкоинтенсивной ножевой мельнице) соломы пшеницы. Данные гранулометрического анализа, проведённого при помощи стандартного набора сит, представлены на рис. 1.

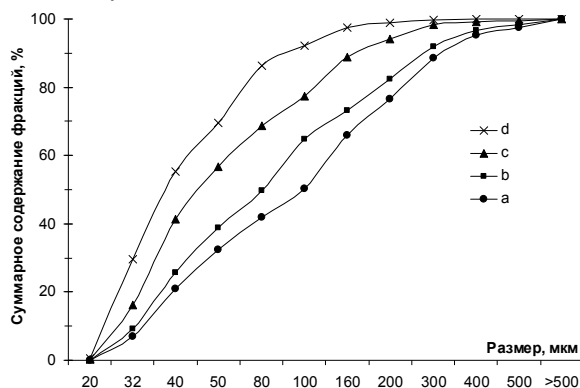


Рисунок 1 – Гранулометрический анализ продуктов механической активации: а-с – продукт активации на центробежно-роликовой мельнице при 2800, 3150 и 3500 об/мин соответственно; d – продукт активации на пневматической мельнице

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Из полученных данных гранулометрического анализа, проведённого рассевом на ситах, были рассчитаны средневесовые размеры частиц в продукте механической обработки, позволяющие характеризовать тонину помола (таблица 3). Видно, что с увеличением энергонапряжённости, уменьшается размер частиц в продукте, что делает его более пригодным для использования в качестве мелкодисперсного топлива.

Таблица 3 – Средние значения размеров частиц в продукте измельчения соломы пшеницы на центробежно-роликовой и пневматической мельнице (ПМ)

Тип обработки	Средневесовой размер частиц, мкм
центробежно-роликовая мельница, 2800 об./мин	141
центробежно-роликовая мельница, 3150 об./мин	118
центробежно-роликовая мельница, 3500 об./мин	77
пневматическая мельница	46

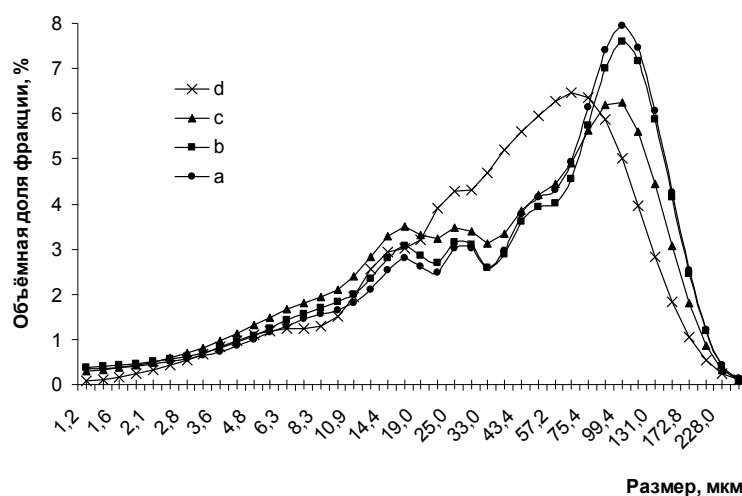


Рисунок 2 –
Результаты гранулометрического анализа методом LDS продукта активации соломы пшеницы:
a, b, c – на центробежно-роликовой мельнице при 2800, 3150 и 3500 об./мин соответственно;
d – на пневматической мельнице

Исследование горения мелкодисперсного растительного сырья с различным содержанием лигнина

В технологиях сжигания каменных твердых топлив в зависимости от их качества применяют слоевое сжигание, сжигание в циркулирующем кипящем слое (ЦКС) с использованием инертного высокотемпературного материала, а также факельное сжигание пылевидного топлива.

Анализируя имеющиеся технологии по сжиганию отходов переработки растительного сырья можно выделить 2 типа установок:

- установки прямого сжигания отходов с получением тепла и электроэнергии в паросиловом цикле;

- когенерационные установки на основе двигателей внутреннего сгорания и ГТУ.

Установки 2-го типа в настоящее время требуют дорогостоящих систем газификации, т.к. прямое использование биотоплива без газификации затруднено из-за заметного количества легкоплавких компонентов золы, загрязняющих рабочие поверхности (лопаточный аппарат ГТУ, поршневая система) двигателей. Кроме того, в нашей стране отсутствует опыт создания и промышленной эксплуатации газификаторов растительного сырья, применяемыми в электроэнергетических установках. Поэтому следует рассматривать установки прямого сжигания отходов переработки растительного сырья, исполь-

зующих традиционные технологии – в плотном слое, кипящем слое и при факельном сжигании пылевидного топлива.

Сжигание в плотном слое не согласуется с технологией переработки соломы с получением мелкодисперсного лигнина – основного отхода технологии и соответственно топлива. Остаются установки кипящего слоя и с пылевидным сжиганием. Установки кипящего слоя используются в проекте переработки растительного сырья по технологиям США и Канады, однако такие установки наряду с известными достоинствами сжигания низкосортных топлив, обладают и рядом недостатков, в т.ч. более высокой стоимостью по сравнению с установками, использующими факельное сжигание. Установки кипящего слоя в этих странах используются обычно при сжигании сырья более грубого помола. В нашей технологии переработки растительного сырья основной отход – топливо - лигнин получается в виде мелкодисперсной пыли с размером частиц менее 100 мкм. Поэтому основной тип котельной установки должен быть с использованием факельного процесса. При этом при сжигании пыли лигнина после ее механохимической обработки могут быть использованы газомазутные котлы, серийно выпускаемые в России на производительность от 6 до нескольких сотен тонн пара в час. Стоимость газомазутных котлов значительно ниже (на 10-20%) котлов со слоевым сжиганием и котлов кипящего слоя. Исходя из вышесказанного, оптимальным способом сжигания лигнина является сжигание в пылеугольном факеле.

Факельное сжигание пылеугольного топлива – прогрессивная технология использования углей в энергетике как с точки зрения интенсификации, экологии так и управления процессами. Растительное сырье весьма распространено и возобновляемо. Поэтому отработка технологии эффективного и экологически чистого факельного сжигания его отходов (после извлечения белковых составляющих) весьма актуальна и перспективна.

Нами выполнены экспериментальные исследования по факельному сжиганию порошкового биотоплива, получаемого в качестве побочного продукта с различным содержанием лигнина из растительного сырья (солома пшеницы). Опыты выполнены на стенде с тепловой мощностью до 5 Мвт (рис. 3). Стенд включает шнековый питатель дисперсной массы в виде порошка (рис. 4, масштаб фотографии 1 мм) и систему подачи (нория) топлива в мельницу дезинтеграционного типа.



Рисунок 3 – Огневой стенд ИТ СО РАН тепловой мощностью 5 МВт



Рисунок 4 – Дисперсная масса порошкового биотоплива

Пневмотранспортом, с эжекторной подачей первичного воздуха, топливо после дезинтегратора подается в форкамеру вихревой горелки (рис.5), затем в предтопок. На рисунке 5 указаны места измерения температуры по тракту процесса горения. Газовый анализ проводился на выходе из предтопка. Поджиг топлива осуществляется в вихревой форкамере штатным запальным устройством (ЗЗУ) с использованием пропан-бутана. После 300-400 с ЗЗУ отключается, так как процесс выходил на автоматический режим горения (рис. 6-8): до $t=1200^{\circ}\text{C}$ (18% лигнина); $t=1300^{\circ}\text{C}$ (30 и 60% лигнина). После предтопка во вторичном дутье идет процесс дожига уходящих газов. В отработку технологии сжигания биотоплива с сухим шлакоудалением (циклон) входило определение оптимального первичного и вторичного воздуха, измерение в реальном масштабе времени температурного (энергетического) уровня автотермического режима горения биотоплива с различным содержанием лигнина (18, 30 и 60%), а также определение состава уходящих газов, соответствующий нормам ПДВ (рис. 6-8).

Technical drawing of a gas furnace with a preheating system. The diagram shows a cross-section of the furnace with various components labeled in Russian. Key parts include the 'Предтопок' (preheating chamber), 'Вторичный воздух' (secondary air), 'Камера дожигания' (afterburning chamber), and 'Отбор газового состава' (gas composition sampling). Dimensions are provided in millimeters, including overall length (4985), width (1235), and various internal spacing and component sizes. Temperature points T1 through T7 and gas composition points G1 through G5 are marked along the furnace length.

не, Это относится и к исследованию процессов горения органического топлива в топочно-горелочных устройствах. Значительную трудность при разработке математической модели горения биомассы составляет большой разброс в химических и физических свойствах данного вещества по сравнению с углем. Не смотря на это, основой для математического описания горения частиц биотоплива служат математические модели горения угольных частиц. В большинстве работ основные отличия в модели горения частицы биомассы и угля относятся к описанию движения частицы, а также ее кинетических характеристик. Предлагаемая в данной главе математическая модель горения частиц биотоплива в горелочном устройстве является развитием комплексной математической модели горения пылеугольного факела описанной в работе [25]. Основными отличиями является введение в модель движения частиц корректирующего фактора учитывающего несферическую форму частицы, а также использование кинетических характеристик процесса выхода летучих и горения коксового остатка характерных для биомассы.

В качестве математической модели для описания течения в топочной камере была принята модель неизотермического несжимаемого многокомпонентного газа. Модель включает уравнения неразрывности, уравнения баланса количества движения, уравнение переноса концентрации компонент, уравнение переноса энергии. В общем виде уравнения сохранения для скалярной величины ϕ записываются:

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \phi) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla \phi) + Q_\phi, \quad \phi = \{l, u, v, w, h, f, k, \varepsilon\},$$

где ϕ – скалярная величина; Γ – эффективный коэффициент диффузионного переноса; Q_ϕ – источниковый член; ρ – плотность, кг/м³; $\mathbf{v}$ – вектор скорости, м/с; u, v, w – компоненты скорости, м/с; h – удельная энтальпия, Дж/кг; k – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м²/с²; ε – диссипация турбулентной энергии, м²/с³; f_i – массовая концентрация, кг/кг.

В данной работе используется модифицированная высокорейнольдсовая k - ε модель турбулентности. Для определения пульсационных характеристик течения вблизи стенок был использован метод пристеночных функций.

Высокий температурный уровень топочной среды и поверхностей обуславливает преобладание радиационного теплообмена. Решение уравнения переноса лучистой энергии базируется на P1 приближения метода

сферических гармоник. Скорость горения i -реактанта, в том числе и летучих, определяется с учетом реакционной способности и концентрации горючего и окислителя, а также скорости турбулентного перемешивания топлива и окислителя. Данная модель представляет комбинацию кинетической модели горения газовых компонент с моделью «обрыва вихря» (eddy break up model).

Для описания процессов движения угольных частиц использовался метод Лагранжа. В отличие от угольных частиц, где форма принимается сферической, для большинства частиц биомассы (такие как древесина, солома), где форма может не быть сферической, сопротивление значительно отличается от сопротивления сферической частицы. В этом случае необходимо учитывать отклонение формы частицы от сферической с помощью введения фактора формы (f). Данный фактор позволяет скорректировать аэродинамическое сопротивление частицы. Фактор (f) определен как отношение площади поверхности эквивалентной сферической частицы к реальной площади поверхности частицы. Сопротивление, которое действует на несферическую частицу, в данной модели выражено через число Рейнольдса для частицы и фактора формы f [26]:

$$C_D = (24 / Re)(1 + b_1 Re^{b_2}) + [b_3 Re / (b_4 + Re)],$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581f + 2.4486f^2),$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565f,$$

$$b_3 = \exp(4.9050 - 13.8944f + 18.4222f^2 - 10.2599f^3),$$

$$b_4 = \exp(1.4681 + 12.258f - 20.7322f^2 + 15.8855f^3),$$

где b_1, b_2, b_3 и b_4 - функции фактора формы.

Учет турбулентности потока на движение частицы производится введением случайных флуктуаций скорости газа в уравнение движения частиц. Это так называемая - stochastic separated flow (SSF) модель.

Для расчета температуры частицы с учетом конвективного и радиационного теплообмена частицы с окружающим газом использовалась математическая модель с рядом эмпирических выражений, которые дали возможность скорректировать теплообмен с учетом массообменных процессов, происходящих при прогреве и горении угольной частицы [27].

Процесс горения частицы биомассы рассматривается подобно горению частицы угля и представляется в виде следующих последовательных этапов: испарение остаточной влаги из топлива, выход и горение летучих компонент и горение коксового остатка.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Испарение остаточной влаги из топлива рассчитывается из разницы концентрации водяного пара на поверхности частицы и в объеме.

Для расчета выхода летучих из частицы биомассы выбрана одностадийная, однокомпонентная модель:

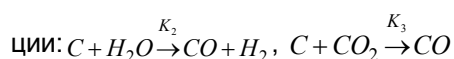
$$\frac{\partial V_{\text{в}}}{\partial t} = (V^T - V_{\text{в}}) \alpha_{\text{в.л.}},$$

$$\text{где } \alpha_{\text{в.л.}} = \frac{1}{1/\alpha_{\text{л.диф.}} + 1/\alpha_{\text{л.кин.}}},$$

$$\alpha_{\text{л.диф.}} = \frac{\text{const}}{d_p^2}, \quad \alpha_{\text{л.кин.}} = K_{\text{в.л.}} e^{-E_{\text{в.л.}}/RT}$$

$V_{\text{в}}$ – количество вышедших летучих (кг/кг); V^T – количество летучих в исходной угольной частице (кг/кг); $\alpha_{\text{в.л.}}$ – скорость выхода летучих (1/с); $\alpha_{\text{л.диф.}}$ – скорость выхода в диффузионном режиме (1/с); $\alpha_{\text{л.кин.}}$ – скорость выхода летучих в кинетическом режиме (1/с); $K_{\text{в.л.}}$ – предэкспоненциальный множитель (1/с); $E_{\text{в.л.}}$ – энергия активации (Дж/моль).

Горение коксового остатка является наиболее длительной стадией. В связи с сложной и не до конца изученной структурой угля и биомассы, в моделях горения коксового остатка используют эмпирические данные. В условиях недостатка кислорода, для полного сгорания биотоплива, в объеме муфеля горелочного устройства, модель горения частицы включает в себя реакцию окисления углерода: $C + O_2 \xrightarrow{K_1} CO_2$ и реакции газификации:



При горении коксового остатка в модели принимается, что изменяется диаметр частицы, а плотность остается постоянной. Для описания горения коксового остатка используется кинетически-диффузионная модель. Изменение диаметра частицы за счет горения описывается уравнением:

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{r_K} K_{S,i}^C, \quad K_S^C = C_i k_i',$$

$$k_i' = \frac{1}{\frac{1}{k_i} + \frac{1}{\beta_i}},$$

$$\beta_i = \frac{Nu_D D_i}{d}, \quad k_i = K_{K_i} e^{-E_{K_i}/RT},$$

где $i=O_2, CO_2, H_2O$, ρ_K – плотность коксового остатка, (кг/м³); K_S^C – скорость горения углерода, (кг/(м²·с)); Nu_D – диффузионное число Нуссельта; D – коэффициент диффузии в газе, (м²/с); k' – константа скорости реакции, (м/с); k – коэффициент реакционного

газообмена, (м/с); β – коэффициент массообмена между частицей и газом, (м/с); K_K – предэкспоненциальный множитель, (1/с); E_K – энергия активации, (Дж/моль).

Для решения уравнений сохранения для газовой фазы используется широко известный метод контрольного объема, суть которого заключается в разбиении расчетной области на контрольные объемы и интегрировании исходных уравнений сохранения по каждому контрольному объему для получения конечно-разностных соотношений. Для вычисления диффузионных потоков на границах контрольного объема используется центрально-разностная схема, имеющая второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов использовалась схема второго порядка точности. Для решения полученной системы уравнений используется метод неполной факторизации, в котором факторизованы только диагональные члены. Для связи поля давления и скорости используется SIMPLE-подобная процедура на совмещенных сетках. При движении частиц через контрольный объем формируется источниковый член, через который учитывается обмен импульсом и энергией между газом и дисперсной фазой.

Обзор изучения кинетики процессов пиролиза и горения коксового остатка показывает большой разброс данных по значениям предэкспоненциального множителя и энергии активации данных процессов. Как показали ранее проведенные исследования кинетики механоактивированного угля, значения энергии активации значительно отличаются от угля не прошедшего активацию механическим способом. Можно предположить, что значения энергии активации частиц биотоплива также будут значительно отличаться от имеющихся в литературе данных. Поэтому для проведения численных исследований необходимо предварительное проведение экспериментальных исследований по кинетическим свойствам механоактивированных частиц биотоплива.

Полученные экспериментальные данные по автотермическому горению продуктов переработки растительного сырья (соломы) на 5 МВт стенде будут служить основой для верификации разработанной математической модели горения мелкодисперсного растительного сырья, которая в дальнейшем даст возможность отработки технологических решений по эффективному и экологически чистому факельному сжиганию растительного сырья.

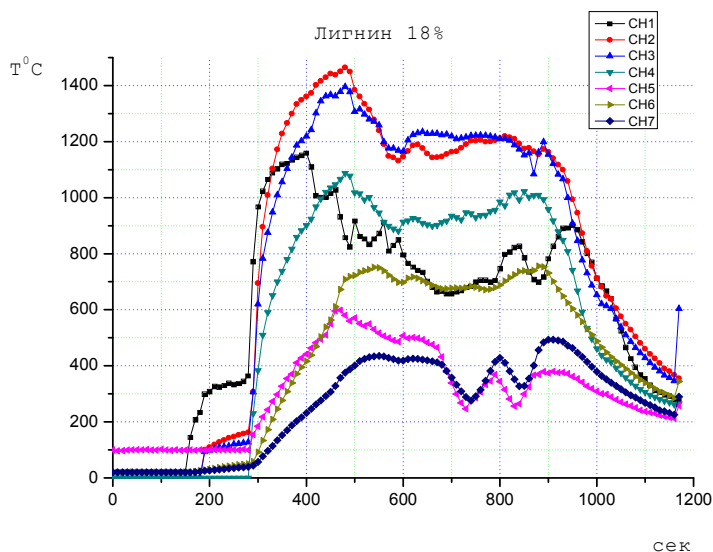


Рисунок 6а – зависимость температуры газов от времени (лигнин 18%).

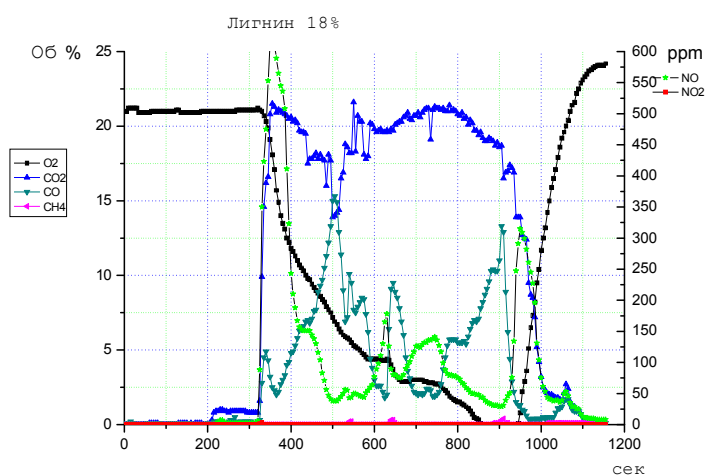


Рисунок 6б – газовый состав продуктов горения растительного сырья (лигнин 18%).

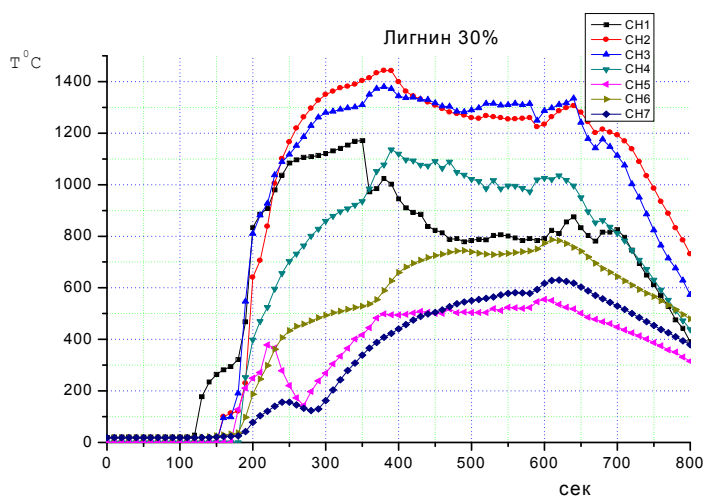


Рисунок 7а – зависимость температуры газов от времени (лигнин 30%).

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

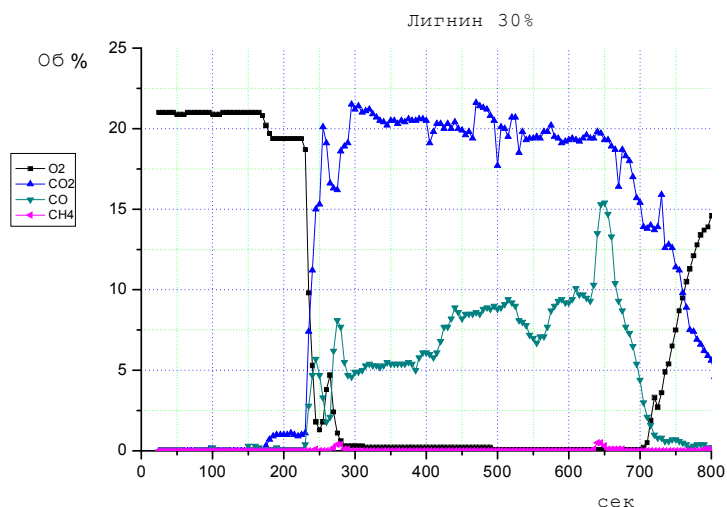


Рисунок 7б – газовый состав продуктов горения растительного сырья (лигнин 30%).

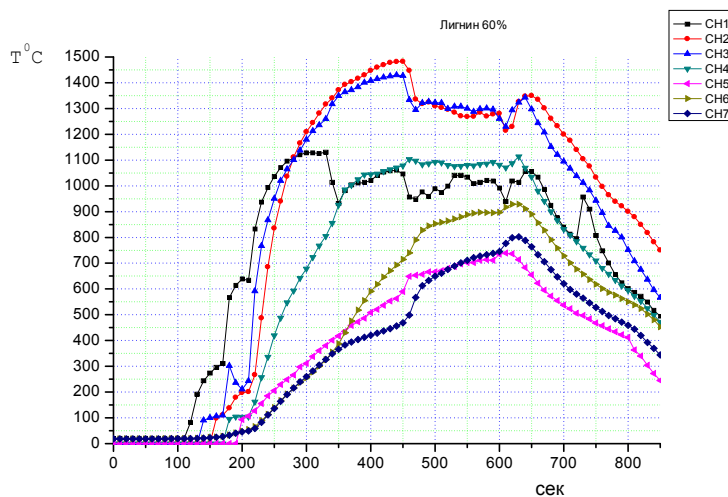


Рисунок 8а – зависимость температуры газов от времени (лигнин 60%).

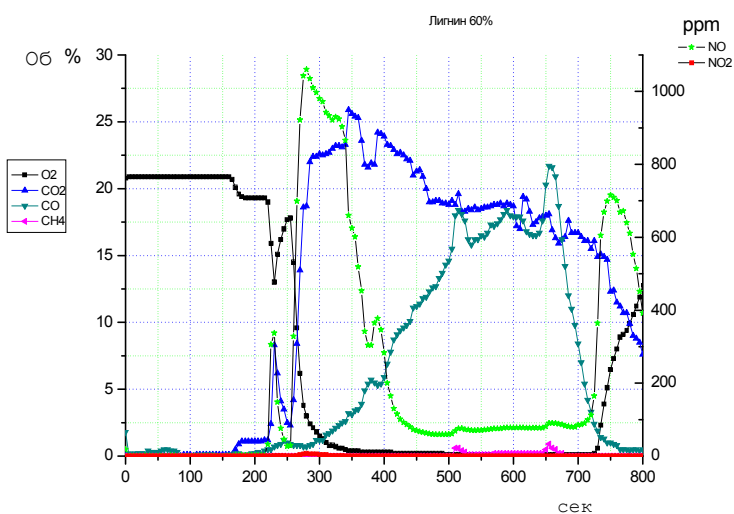


Рисунок 8б – газовый состав продуктов горения растительного сырья (лигнин 60%).

Таблица 4 – Данные по расходу топлива и воздуха в зависимости от содержания лигнина в биотопливе

Биотопливо с содержанием лигнина, %	Расход пылеугольного топлива, кг/час	Расход биотоплива, кг/час	Расход первичного воздуха для пылеугольного топлива, м ³ /час	Расход первичного воздуха для биотоплива, м ³ /час	Расход вторичного воздуха, м ³ /час
18	86	95	137	125	600
30	86	107	137	137	600
60	86	117	142	139	600

Выводы

1. Предложена новая технология переработки растительного сырья с использованием отходов в энергетических установках.
2. Проведены эксперименты по сжиганию отходов переработки (лигнина) на укрупненном огневом стенде мощностью 5Мвт.
3. Разработана математическая модель горения мелкодисперсного растительного сырья, которая позволяет отработать технологические решения по эффективному и экологически чистому факельному сжиганию данного вида топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биотопливо и энергия для развития страны // Наука в России. 2012. № 4. С. 28-32.
2. Sims R.E.H., Mabee W., Saddler J.N., Taylor M. An overview of second generation biofuel technologies // Bioresource Technology. 2010. V. 101. P. 1570-1580.
3. Barz M., Delivand M.K. Agricultural residues as a promising biofuels for biomass power generation in Thailand // Journal of Sustainable Energy & Environment. 2011. Special Issue. P. 21-27.
4. Nguyen Q.A., Keller F.A., Tucker M.P., Lombard C.K. et al. Bioconversion of mixed solid waste to ethanol // Applied Biochemistry and Biotechnology. 1999. V. 77-79. P. 455-472.
5. Tan Z., Liu S., Bliss N., Tieszen L.L. Current and potential sustainable corn stover feedstock for biofuel production in the United States // Biomass and Bioenergy. 2012. V. 47. P. 372-386.
6. Wyman C.E. Biomass ethanol: technical progress, opportunities, and commercial challenges // Annual Review Energy Environment. 1999. V. 24. P. 189-226.
7. Piriou B., Vaitilingom G., Veyssiere B., Cuq B., Rouau X. Potential direct use of solid biomass in internal combustion engines// Progress in Energy and Combustion Science – 2013.-V. 39.- P. 169 – 188.
8. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass// Bioresource Technology – 2002.- V.83.- P. 37 - 46.
9. Bridgwater A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass// Chemical Engineering Journal.- 2003.- V.91(2-3).- P.87-102.
10. Yang Y.B., Sharifi V.N., Swithenbank J., Ma L., Darvell L.I., Jones J.M. et al. Combustion of a single particle of biomass// Energy and Fuels.- 2008.- V.22.- P.306-316.
11. Jones J.M., Pourkashanian M., Williams A., Hainsworth D. A comprehensive biomass combustion model// Renewable Energy – 2000.- V.19. P. 229-234.
12. Bharadwaj A., Baxter L.L., Robinson A.L. Effects of intraparticle heat and mass transfer on biomass devolatilization: experimental results and model predictions// Energy and Fuels – 2004.- V.18.- P. 1021-1031.
13. Miller RS, Bellan J. Analysis of reaction products and conversion time in the pyrolysis of cellulose and wood particles// Combustion Science and Technology – 1996.- V.119.- P. 331-373.
14. Kobayashi N, Guilin P, Kobayashi J, Hatano S, Itaya Y, Mori S. A new pulverized biomass utilization technology// Powder Technology – 2008.-V.180.- P. 272-283.
15. Голязимова О.В., Политов А.А. Интенсификация процесса измельчения опилок// Химия в интересах устойчивого развития – 2008. – Т. 16, № 5. – С. 598-592.
16. Голязимова О.В. Политов А.А., Ломовский О.И. Увеличение эффективности измельчения лигноцеллюлозного растительного сырья с помощью химической обработки// Химия растительного сырья – 2009. – № 2. – С. 53-57.
17. Bychkov, A.L., Ryabchikova E.I., Korolev K.G., Lomovsky O.I. Ultrastructural changes of cell walls under intense mechanical treatment of selective plant raw material // Biomass and Bioenergy. – 2012. – V. 47. – P. 260-267
18. Cui H., Grace J.R. Pneumatic conveying of biomass particles: a review// China Particulology – 2006.- V.4(3-4).- P.183-188.
19. Joppich A., Salman H. Wood powder feeding, difficulties and solutions// Biomass and Bioenergy – 1999.- V.16.- P. 191-198.
20. Calvert G., Ghadiri M., Tweedie R. Aerodynamic dispersion of cohesive powders: a review of understanding and technologies// Advanced Powder Technology.- 2009.- V.20.- P. 4-16.
21. Woods J.A., Thorpe R.B., Johnson S.E. Horizontal pneumatic conveying from a fluidized bed// Chemical Engineering Science.- 2008 – V.63. - P. 1741-1760.
22. Wilen C., Rautalin A. Handling and feeding of biomass to pressurized reactors: safety engineering// Bioresource Technology – 1993.- V.46.- P.77-85.
23. Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов. М.: МГУ, 1995. 224 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗНОГО СЫРЬЯ В КАЧЕСТВЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

24. Аввакумов Е.Г., Гусев А.А. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. Новосибирск: Гео, 2009, 155 с.

25. Бурдуков А.П., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Чернецкая Н.С. Исследование оптимальной конструкции горелочного устройства для обеспечения устойчивости аэродинамической структуры потока в горелке и интенсификации процессов смешения в зоне горения // Ползуновский вестник.- 2012.- № 3/1.- С. 55-61.

26. Haider A, Levenspiel O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. Powder Technol 1989;58(1):63–70.

27. Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. Математическая модель процессов теплообмена и горения пылеугольного топлива при факельном сжигании // Физика горения и взрыва.- 2011.- № 3.- С. 37-46.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного контракта от 29.03.2013 г. N 14.516.11.0048

Бурдуков А.П.¹, д.т.н., проф.,
главный научный сотрудник,
Попов В.И. .П.¹, д.т.н., с.н.с.,
ведущий научный сотрудник,
тел. (8 383) 316 53 37,
e-mail: vipopov@itp.nsc.ru,
Чернецкий М.Ю.¹, к.т.н., инженер,
тел. (8391) 2494726,
e-mail: Micch@yandex.ru
Дектерев А.А.¹, к.т.н., с.н.с.,
старший научный сотрудник,
тел. (8391) 2494726
e-mail: dekterev@mail.ru
Ломовский О.И.², д.х.н., проф.,
ведущий научный сотрудник,
тел. (8383) 3326657,
e-mail: lom@solid.nsc.ru
Бычков А.Л.², к.х.н.,
научный сотрудник,
тел. (8383) 3320657,
e-mail: bechkov@solid.nsc.ru

¹ Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения РАН, 630090,
Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1,
тел. (8391) 2494726

² Институт химии твердого тела и механохимии
Сибирского отделения РАН, 630128,
Новосибирск, просп. Акад. С.С. Кутателадзе, 18.