

УДК 662.612: 662.613: 66.088

## Расчетное исследование факельного горения мелкодисперсного лигноцеллюлозного сырья

М.Ю. Чернецкий<sup>а,б</sup>,

А.А. Дектерев<sup>а,б\*</sup>, А.П. Бурдуков<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Сибирский федеральный университет,

Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>б</sup>Институт теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе

Россия 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 1

Received 04.05.2013, received in revised form 02.09.2013, accepted 11.09.2013

*В статье представлена математическая модель и проведено расчетное исследование горения мелкодисперсного лигноцеллюлозного топлива прошедшего измельчение на мельничных устройствах с различной степенью энергонапряжённости. Выполнена верификация математической модели с использованием экспериментальных данных по автотермическому режиму горения продуктов переработки растительного сырья (соломы) на стенде мощностью 5 МВт.*

*Ключевые слова: горение биотоплива, солома пшеницы, численное моделирование.*

### Введение

Получение и использование экологически чистого топлива из возобновляемых лигноцеллюлозных источников выступает важной и актуальной задачей для науки и промышленности [1]. В большинстве регионов мира ведутся исследования подходящего вида топлива, включая биомассу произрастающих в регионе растений, невостребованные отходы сельского хозяйства [2], городской мусор [3], а также поиск наиболее энергетически и экологически эффективного способа его переработки.

Одним из перспективных топлив на территории России является солома пшеницы – основной отход при выращивании 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. Вследствие слабого вовлечения соломы в сельскохозяйственный цикл она в измельчённом виде запахивается в почву при уборке зерновых или накапливается на полях и сжигается.

Наиболее перспективным способом сжигания соломы является факельное сжигание, которое при правильной организации отвечает предъявляемым требованиям как с точки зрения интенсификации, экологии, так и управления процессами. В ИТ СО РАН ведутся эксперимен-

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: dektev@mail.ru



Рис. 1. Огневой стенд ИТ СО РАН тепловой мощностью 5 МВт

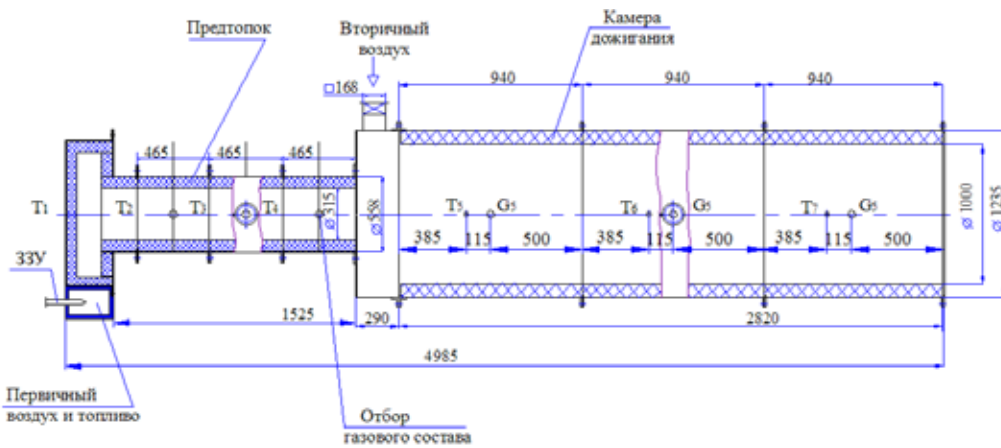


Рис. 2. Схема огневого стенда ИТ СО РАН тепловой мощностью 5 МВт

тальные исследования по факельному сжиганию порошкового биотоплива, получаемого из растительного сырья (солоты пшеницы). Опыты выполняются на стенде с тепловой мощностью до 5 МВт (рис. 1). Схема топочной камеры, а также места расположения термодпар показаны на рис. 2.

Стенд включает шнековый питатель дисперсной массы и систему подачи топлива в мельницу дезинтеграторного типа. Данный тип мельницы, как показали исследования, позволяет провести механоактивацию топлива с увеличением реакционных свойств топлива [4], что способствует интенсификации процесса горения и уменьшению габаритов горелочного устройства.

Новым элементом предлагаемой технологии сжигания отходов растительного сырья является комплексное использование принципов микропомол в мельнице дезинтеграторного типа с целью увеличения реакционных свойств топлива и термоподготовки топлива в предтопке при предварительном сжигании с недостатком кислорода воздуха. Если первый принцип повышает энергетические свойства топлива (интенсификацию горения), то термоподготовка топлива направлена на улучшение экологических показателей горения.

В связи со значительными затратами на проведение экспериментальных работ невозможно провести исследования для всех интересующих режимов сжигания с целью выбора наиболее оптимальных параметров горелочного устройства. Поэтому необходимо разработать математические модели, которые позволили бы получить информацию об аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене в разрабатываемых топочно-горелочных устройствах для сжигания органического сырья.

Значительную трудность при разработке математической модели горения биомассы составляет большой разброс в химических и физических свойствах данного вещества по сравнению с углем. Несмотря на этот факт, 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 статье математическая модель горения частиц биотоплива в горелочном устройстве выступает развитием комплексной математической модели горения пылеугольного факела, описанной в работе [5]. Дополнительно в модель движения частиц был введен корректирующий фактор, учитывающий несферичную форму частицы, а также использованы кинетические характеристики процесса выхода летучих и горения коксового остатка, характерных для биомассы.

В статье рассмотрено влияние помола, который, в свою очередь, зависит от типа мельницы и количества оборотов мельничного устройства, на процесс горения в горелочном устройстве огневого стенда мощностью 5 МВт.

### Математическая модель

Для описания движения потока 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  $\phi$  записываются

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \phi) = \nabla(\Gamma \cdot \nabla \phi) + Q_\phi, \quad \phi = \{1, u, v, w, h, f_i, k, \varepsilon\},$$

где  $\phi$  – скалярная величина;  $\Gamma$  – эффективный коэффициент диффузионного переноса;  $Q_\phi$  – источникный член;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{v}$  – вектор скорости, м/с;  $u, v, w$  – компоненты скорости, м/с;  $h$  – удельная энтальпия, Дж/кг;  $k$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\varepsilon$  – диссипация турбулентной энергии, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $f_i$  – массовая концентрация, кг/кг.

В данной статье использована модифицированная высокорейнольдсовая k- $\varepsilon$ -модель турбулентности. Для определения пульсационных характеристик течения вблизи стенок был применен 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-реагента, 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 использовали метод Лагранжа. В отличие от угольных частиц, форма которых принимается сферической, для большинства частиц биомассы (такие как древесина, солома) форма может быть несферической, а сопротивление значительно отличаться 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  $f$  [6]:

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

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

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565f$$

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

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

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 использовали математическую модель с рядом эмпирических выражений, которые дали возможность скорректировать теплообмен с учетом массообменных процессов, происходящих при прогреве и горении угольной частицы [7].

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.

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:

$$\frac{\partial V_g}{\partial t} = (V^T - V_g) \alpha_{в.л.}, \text{ где } \alpha_{в.л.} = \frac{1}{1 / \alpha_{л.диф.} + 1 / \alpha_{л.кин.}}$$

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

где  $V_g$  – количество вышедших летучих, кг/кг;  $V^T$  – количество летучих в исходной угольной частице кг/кг;  $\alpha_{в.л.}$  – скорость выхода летучих, 1/с;  $\alpha_{л.диф.}$  – скорость выхода в диффузионном

режиме,  $1/c$ ;  $\alpha_{\text{л.кин.}}$  – скорость выхода летучих в кинетическом режиме,  $1/c$ ;  $K_{\text{в.л}}$  – предэкспоненциальный множитель,  $1/c$ ;  $E_{\text{в.л}}$  – энергия активации, Дж/моль.

Горение коксового остатка является наиболее длительной стадией. В связи со 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:  $C + H_2O \xrightarrow{K_2} CO + H_2$ ,  $C + CO_2 \xrightarrow{K_3} CO$ .

При горении коксового остатка в модели принимается изменение диаметра частицы, постоянство плотности. Для описания горения коксового остатка применяют кинетически-диффузионную модель. Изменение диаметра частицы за счет горения описано уравнением

$$\frac{d(d_p)}{dt} = \frac{2}{\rho_K} K_{S,i}^C$$

$$K_S^C = C_i k_i'$$

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

$$\beta_i = \frac{Nu_d D_i}{d}$$

$$k_i = K_{K_i} e^{-E_{K_i}/RT}$$

где  $i=O_2, CO_2, H_2O$ ,  $\rho_K$  – плотность коксового остатка,  $кг/м^3$ ;  $K_S^C$  – скорость горения углерода,  $кг/(м^2 \cdot с)$ ;  $Nu_d$  – диффузионное число Нуссельта;  $D$  – коэффициент диффузии в газе,  $м^2/с$ ;  $k'$  – константа скорости реакции,  $м/с$ ;  $k$  – коэффициент реакционного газообмена,  $м/с$ ;  $\beta$  – коэффициент массообмена между частицей и газом,  $м/с$ ;  $K_K$  – предэкспоненциальный множитель,  $1/c$ ;  $E_K$  – энергия активации, Дж/моль.

Для решения уравнений сохранения для газовой фазы используют широкоизвестный 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 гранях контрольного объема применяют центрально-разностную схему, имеющую второй порядок точности. При аппроксимации конвективных членов используют схему второго порядка точности. Для решения полученной системы уравнений – метод неполной факторизации, в котором факторизованы только диагональные члены. Для связи полей давления и скорости используют SIMPLE-подобную процедуру на совмещенных сетках. При движении частиц через контрольный объем формируется источниковый член, через который учитывают 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 механоакти-

вированного 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 численного моделирования необходимо предварительное проведение экспериментальных исследований по кинетическим свойствам механоактивированных частиц биотоплива. В связи с отсутствием подобных данных в качестве кинетических констант были взяты значения соломы пшеницы из работы [8], представленные в табл. 1.

В таблице 2 представлен элементный и технический состав соломы пшеницы. В таблице 3 – расходы топлива и воздуха.

Измельчение производилось на центробежно-роликовой мельнице при 2800, 3125 и 3800 об/мин и дезинтеграторе. Данные гранулометрического анализа, проведённого при помощи стандартного набора сит, представлены на рис. 3. Видно, что с увеличением энергонапряжённости уменьшается размер частиц в продукте, что делает его более пригодным для использования в качестве мелкодисперсного топлива.

### Результаты расчетов

Для расчетов построения расчетной сетки и анализа результатов используется пакет программ «SigmaFlow» [9]. Расчетная сетка составляет 780 000 ячеек (рис. 4).

На рисунках 5а–г представлены поля температур в центральном сечении огневого стенда. Одним из основных элементов конструкции стенда, обеспечивающим стабильное воспламенение топлива, является футерованная улитка. Как показали исследования, она дает возможность воспламенить солому пшеницы в рассматриваемых вариантах, но дальнейшее развитие процесса горения в цилиндрической камере определяется свойствами топлива. Наиболее длительное воспламенение и горение наблюдаются для варианта с центробежно-роликовой мельницей при 2800

Таблица 1. Кинетические константы процесса горения соломы пшеницы [8]

	Процесс выхода летучих веществ		Горение коксового остатка	
	$A$ [1/с]	$E$ [Дж/моль]	$A$ [1/с]	$E$ [Дж/моль]
Солома пшеницы	22 400	88 200	19 800 000	154 000

Таблица 2. Технический, элементный состав соломы пшеницы

$W^r$	$A^r$	$V^{daf}$	$C^r$	$H^r$	$S^r$	$O^r$	$N^r$	$Q^r$ , МДж/кг
7,3	8,92	68,28	38,2	5,56	0,31	39,0	0,71	14,28

Таблица 3. Расход биотоплива и воздуха огневого стенда

Расход биотоплива, кг/ч	Расход первичного воздуха для биотоплива, м <sup>3</sup> /ч	Расход вторичного воздуха, м <sup>3</sup> /ч
95	125	600

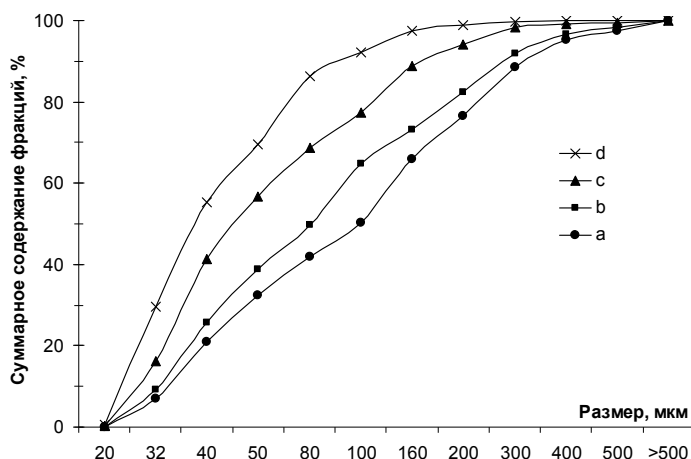


Рис. 3. Гранулометрический анализ продуктов механической активации: а–с – продукт активации на центробежно-роликовой мельнице при 2800, 3150 и 3500 об/мин соответственно; d – продукт активации на дезинтеграторе

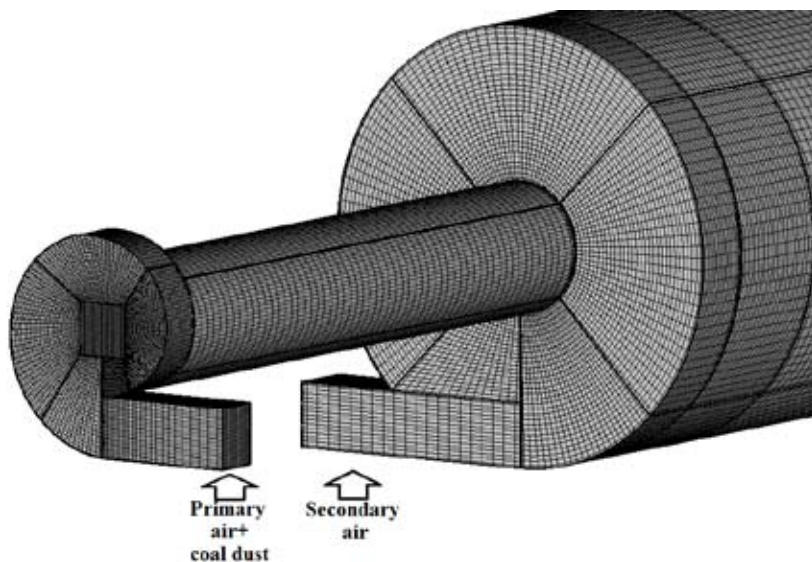


Рис. 4. Расчетная сетка камеры сгорания огневого стенда

об/мин (рис. 5а). Это в первую очередь объясняется более крупным помолом частиц соломы. Похожая картина распределения температур представлена и для варианта с 3150 об/мин (рис. 5б). Значительное увеличение скорости горения биотоплива происходит при энергонапряженности мельничного устройства 3500 об/мин на центробежно-роликовой мельнице. Температуры в горелочном устройстве значительно возрастают, достигая 1300 °С в цилиндрическом канале. Максимальные температуры в горелке наблюдаются после помола биотоплива на дезинтеграторе. После помола на центробежно-роликовой мельнице при 3500 об/мин температуры немного ниже и область высоких температур смещена ближе к выходу из горелки, что свидетельствует о задержке воспламенения и горения биотоплива по сравнению с предыдущим вариантом.

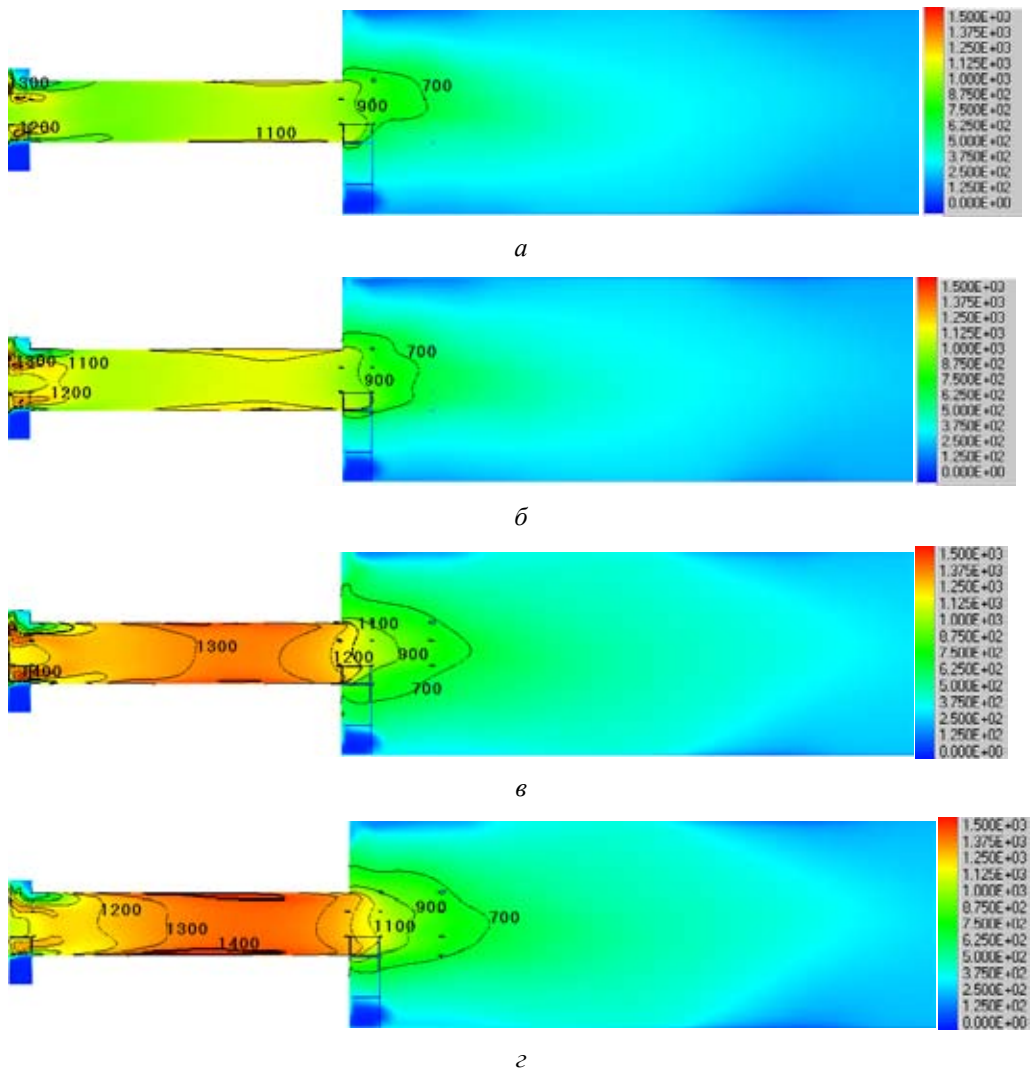


Рис. 5. Распределение температур в центральном сечении огневого стенда при измельчении соломы: *а* – в центробежно-роликовой мельнице при 2800 об/мин; *б* – 3150 об/мин; *в* – 3500 об/мин; *г* – в мельнице-дезинтеграторе

На рисунке 6 представлен график значений температур вдоль линии расположения термопар на экспериментальном стенде (рис. 2). Данные значения были получены при сжигании соломы после ее измельчения в мельнице-дезинтеграторе и расходов, представленных в табл. 3. Из данного графика можно сделать выводы о том, что полученные расчетные данные достаточно хорошо согласуются с экспериментом. Наибольшее отличие наблюдается на начальном участке факела, что может быть объяснено неучетом в модели повышения реакционной способности соломы после ее измельчения на дезинтеграторе.

На рисунке 7 показаны интегральные значения температур вдоль горелочного устройства. Самый высокий уровень температур для варианта с мельницей+дезинтегратором. Из данного графика видно, что, несмотря на то что на начальном участке мы можем наблюдать похожие значения температур, дальнейшее развитие воспламенения топлива происходит по-разному,



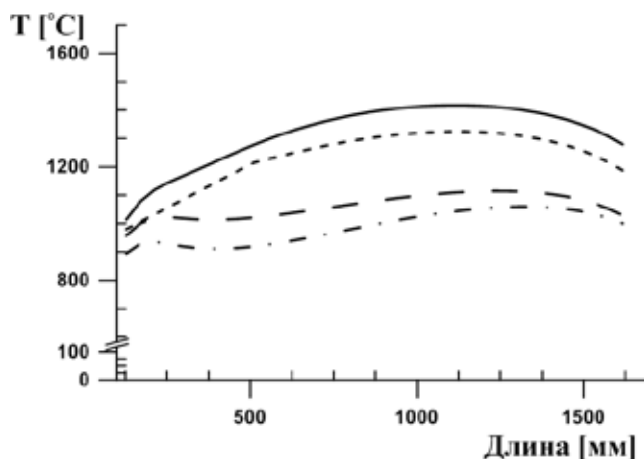


Рис. 6. Распределение температур вдоль линии расположения термопар  $T_2$ – $T_4$ , °С

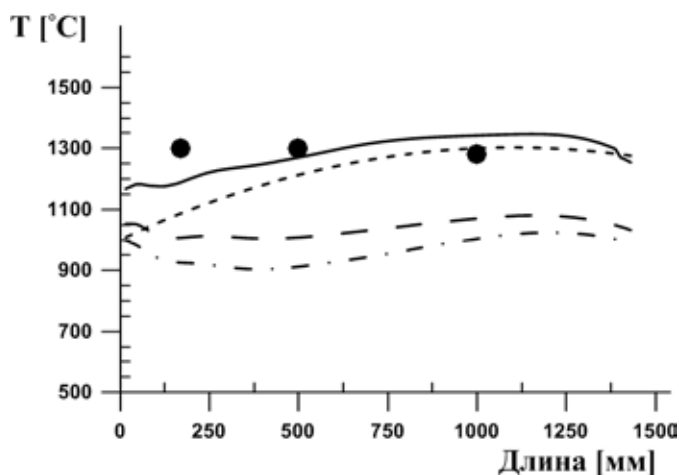


Рис. 7. Распределение интегральных температур по длине горелочного устройства, °С

что объясняется отличительными характеристиками топлива после помола. Температура на выходе из горелки для варианта с помолом на центробежно-роликовой мельнице с 2800 об/мин составляет 930 °С, 3150 об/мин – 990 °С, 3500 об/мин – 1150 °С и при помоле на дезинтеграторе 1300 °С.

Распределение концентраций газовых компонент (рис. 8–10) показывает, что для варианта с дезинтегратором происходит практически полное потребление кислорода, а на выходе из горелки формируется высокорреакционная смесь, которая позволяет создать условия для воспламенения и стабилизации горения в топочной камере

### Выводы

С использованием разработанной математической модели выполнены расчетные исследования горения мелкодисперсного растительного сырья (соломы) на 5 МВт. Исследование влия-

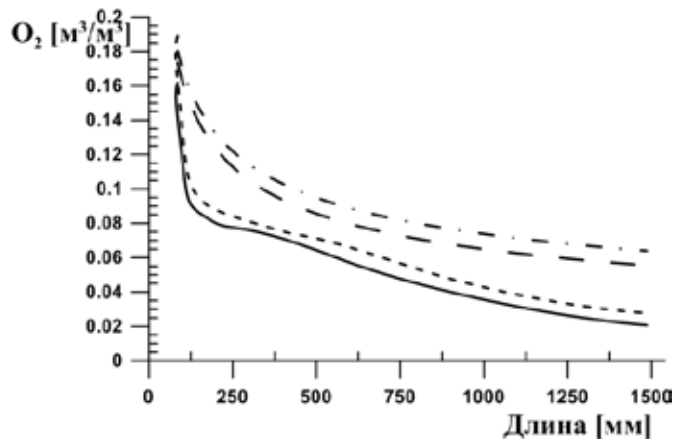


Рис. 8. Распределение концентрации кислорода по длине горелочного устройства,  $\text{м}^3/\text{м}^3$

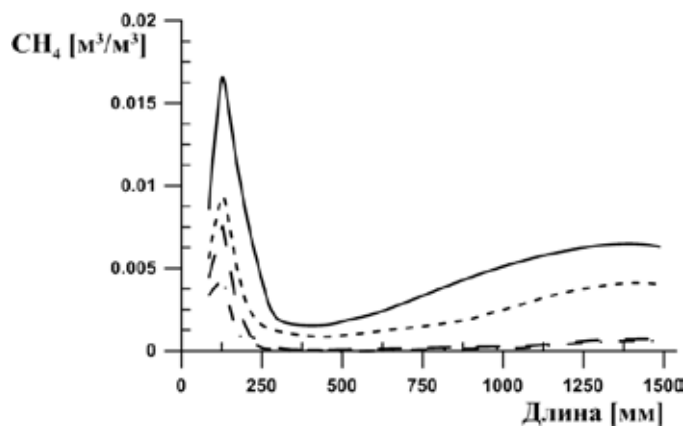


Рис. 9. Распределение концентрации летучих компонент по длине горелочного устройства,  $\text{м}^3/\text{м}^3$

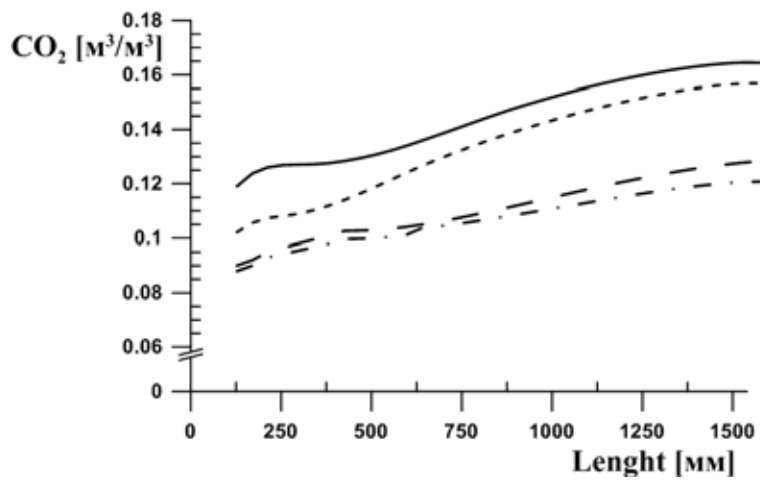


Рис. 10. Распределение концентрации  $\text{CO}_2$  по длине горелочного устройства,  $\text{м}^3/\text{м}^3$

ния степени помола на процессы воспламенения и горения в горелочном устройстве огневого стенда показало, что при размоле на центробежно-роликовой мельнице с 3500 об/мин, а также на мельнице-дезинтеграторе можно создать благоприятные условия для стабилизации факела в объеме топочной камеры. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными по сжиганию соломы на 5 МВт стенде ИТ СО РАН продемонстрировало удовлетворительное согласование, а также необходимость в дополнительном исследовании по определению кинетических констант горения соломы пшеницы с целью их дальнейшего использования в математической модели для оптимизации процессов сжигания биотоплива.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного контракта от 29.03.2013г. № 14.516.11.0048 и СП-6672.2013.1*

### 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. // Bioresource Technology. 2010. V. 101. P. 1570-1580.
- [3] Barz M., Delivand M.K. // Journal of Sustainable Energy & Environment. 2011. Special Issue. P. 21-27.
- [4] Burdukov A.P., Popov V.I., Faleev, V.A. // Thermal Science, 2009. 13(1). P. 127-138.
- [5] Бурдуков А.П., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Чернецкая Н.С. // Ползуновский вестник. 2012. № 3/1. С. 55-61.
- [6] Haider A, Levenspiel O. // Powder Technol. 1989. 58(1). P. 63-70.
- [7] Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А. // Физика горения и взрыва. 2011. № 3. С. 37-46.
- [8] Cuiping Wang, FengyinWang, QirongYang, Ruiguang Liang // BIOMASS AND BIOENERGY 33(2009) 50-56.
- [9] Дектерев А.А., Тэффер Е.С., Чернецкий М.Ю. // Наука из первых рук. 2012. № 12. С. 63-71.

## **Numerical Research of Pulverized Combustion of Micro-Grinded Lignocellulose Raw Materials**

**Mikhail Yu. Chernetskiy<sup>a,b</sup>,  
Alexander A. Dekterev<sup>a,b</sup> and Anatoliy Burdukov<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup>Institute of ThermASophysics SB R  
I ak. Lavrentiev. Novosibirsk, 630090 Russia*

*<sup>b</sup>Siberian Federal University  
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia*

---

*In work the mathematical model is presented and numerical research of burning of micro-grinded lignocellulose raw materials is executed. This fuel was crushed by means of mill devices with various degree of power intensity. Verification of mathematical model with use of experimental data on an autothermal mode of burning of products of processing of vegetable raw materials (straw) on 5 MWt the stand is executed.*

*Ключевые слова: biofuel combustion, wheat straw, numerical modeling.*

---