

ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ГРАНИЦ ТЕПЛОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СЛОЕВОГО ГОРЕНИЯ БИОМАССЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ ЛОКАЛЬНОГО ХИМИЧЕСКОГО РАВНОВЕСИЯ

Донской Игорь Геннадьевич

к.т.н., старший научный сотрудник лаборатории термодинамики,

e-mail: donskoy.chem@mail.ru

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Аннотация. В статье исследуется зависимость стационарной температуры слоевого горения биомассы от скорости подачи и удельного расхода воздушного дутья. Для этого стационарное уравнение теплового баланса вместе с простейшим уравнением кинетики для химической реакции решается в широком диапазоне параметров. Для численного решения вводится ряд допущений (узкая зона реакции, преимущественный отвод теплоты путем лучистой теплопроводности, равновесный состав продуктов окисления). Результаты расчетов дают граничные значения расходных и стехиометрических параметров, при которых возможно устойчивое горение.

Ключевые слова: математическое моделирование, слоевое горение, тепловая устойчивость, термодинамическое моделирование.

Цитирование: Донской И.Г. Численная оценка границ тепловой устойчивости слоевого горения биомассы в приближении локального химического равновесия // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2021. № 3 (23). С. 74-88. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.007.

Введение. Анализ стационарных состояний химических реакторов является одним из важных вопросов химической технологии. Множественность стационарных состояний и их устойчивость оказывают влияние на выбор условий проведения химических процессов, в том числе в энергетических установках. Как известно из теории устойчивости химических реакторов, взаимодействие химической реакции и теплообмена может приводить к сложному динамическому поведению. Устойчивые стационарные режимы возможны при подходящем соотношении скорости химической реакции и процессов переноса. Граница существования таких режимов определяется существованием совместного решения уравнений, описывающих химическую кинетику и тепломассообмен, а также свойствами производных от этих уравнений по искомым переменным [1].

Характеристики стационарных состояний процессов слоевого горения топлив определяет выбор режимов их сжигания (и других способов термохимической конверсии) в энергетических и технологических топочных устройствах. Как правило, процесс сгорания твердых топлив можно разделить на ряд стадий: сушка, пиролиз и горение летучих веществ, горение и газификация коксозольного остатка. Эти стадии протекают в разных областях топочного устройства в зависимости от организации процесса. Помимо химических реакций органической части топлива и тепломассопереноса, при описании слоевого сжигания необходимо рассматривать также фазовые переходы минеральной части, разрушение частиц, проседание слоя, спекание и образование прогаров, унос частиц и т.д.

Динамика горения одиночных частиц биомассы исследовалась экспериментально [2, 3] и теоретически [4, 5] для разных условий теплообмена. Основными параметрами являются размер частицы, температура нагрева и, в некоторых случаях, скорость нагрева. В слое частиц каждый следующий ряд частиц реагирует с газом, поступающим из предыдущего ряда, поэтому условия зажигания и горения существенно изменяются [6, 7].

Способы оценки границ теплового зажигания и саморазогрева слоя топлива, основанные на классической теории горения, предложены в работах [4, 8, 9]. В работе [10] дается классификация режимов горения засыпок, в статье рассматриваются процессы на разных масштабах (поры внутри частицы, частица в целом, слой частиц). Процессы медленного горения пористых систем рассматриваются в работах [11, 12]. В [13, 14] предложены методы расчета установившихся характеристик фронта фильтрационного горения твердых топлив. Модели горения пористых сред с вынужденной и естественной конвекцией окислителя предложены в работах [15, 16]. Детальная химическая кинетика процессов пиролиза органической массы и окисления продуктов и ее влияние на процессы в слое исследовались в [17, 18].

В работе [19] устойчивость слоевого горения рассматривалась для модели с сосредоточенными параметрами. При этом предполагалось, что в узкой зоне реакции, в которой происходит практически полное расходование окислителя, можно считать распределение концентраций реагентов установившимся. В этом случае, интегральные уравнения химической кинетики и теплопередачи эквивалентны уравнениям, описывающим стационарное состояние реактора идеального перемешивания. Тогда условия тепловой устойчивости фронта горения соответствуют условиям тепловой устойчивости эквивалентного реактора с эффективными граничными условиями. Приближения такого рода использовались в работах [20, 21].

Состав продуктов горения биомассы сложным образом зависит от условий протекания гетерогенных и гомогенных химических реакций. Чтобы упростить оценку состава продуктов, часто используется квазиравновесное приближение [22, 23]. Этот подход позволяет уйти от неопределенности кинетических коэффициентов и погрешности брутто-кинетических схем, хотя вносит погрешность, связанную с отклонением состава продуктов от равновесного. Подробный анализ этих приближений требует отдельного исследования. Отметим, что квазиравновесный подход применяется для определения характеристик процессов газификации в реакторах разных типов [24-27]. Строгое обоснование квазиравновесного приближения может быть дано с помощью полноценного анализа временных масштабов в исследуемых системах [28] (в настоящей работе такой анализ не проводится, приближение локального равновесия используется как гипотеза).

Лучистый перенос является одним из основных механизмов переноса при горении в пористых средах (например, в [29] предложен способ расчета теплообмена между слоями частиц в приближении излучающих экранов). В настоящей работе рассматривается процесс реагирования частиц биомассы (сушка, пиролиз и окисление) с теплоотводом от зоны горения путем теплопроводности (каркасной и лучистой) и конвективного выноса теплоты продуктами горения. Тогда границы существования устойчивого горения существуют даже при отсутствии теплопотерь через стенку (их влияние исследовалось, например, в [30, 31, 32]). При специальных условиях возможны специальные режимы горения, когда подогрев окислителя теплотой продуктов сгорания приводит к существенному росту температуры на фронте горения (т.н. сверхадиабатические режимы горения [21, 33]). В настоящей работе рассматриваются процессы, в которых рекуперация теплоты не происходит: окислитель поступает в зону горения при той же температуре, что и топливо.

1. Математическая модель. В данной работе рассматривается приближение однородного по сечению фронта горения. Для процессов с неоднородным распределением проницаемости могут проявляться разные типы неустойчивости, приводящие к образованию прогаров [34, 35]. Эти явления, однако, часто приводят к нестационарным режимам горения, для которых предложенная модель не применима. Уравнение теплопередачи запишется следующим образом:

$$c_p G \frac{dT}{dz} = \lambda \frac{d^2T}{dz^2} + \rho Q r(\xi, T). \quad (1)$$

Здесь c_p – удельная теплоемкость, ρ – плотность, G – удельный расход реагентов, T – температура, z – координата, λ – коэффициент теплопроводности, Q – тепловой эффект реакции, r – удельная скорость горения, ξ – степень превращения топлива. Используя характерную толщину зоны горения δ , можно записать уравнение (1) приближенно в следующем виде:

$$\frac{c_p G}{\delta} (T - T_0) = \frac{\lambda}{\delta^2} (T - T_0) + \rho Q r(\xi, T). \quad (2)$$

Далее, предположим, что кинетика разложения биомассы в присутствии кислорода имеет первый порядок по топливу:

$$G \frac{d\xi}{dz} = -\rho r(\xi, T). \quad (3)$$

Снова используя характерную толщину, запишем уравнение (3) в следующем виде:

$$\frac{G}{\delta} (1 - \xi) = \rho r(\xi, T). \quad (4)$$

Можно видеть, что уравнения (2) и (4) можно записать в виде, соответствующем классической модели реактора идеального перемешивания. Состав сырья задан, управляющими параметрами являются время пребывания сырья в реакционной зоне, а также температура нагрева и скорость теплообмена. В реальных аппаратах характеристики теплообмена и температура нагрева могут изменяться в разных областях реакционной зоны, однако в целях упрощения принимается постоянство (или усреднение) этих величин. Уравнения баланса теплоты и массы записываются следующим образом:

$$\sum_j^N h_j(T^0) n_j^0 = \sum_j^N h_j(T) n_j - \tau \alpha (T^0 - T), \quad (5)$$

$$n_j^0 - n_j = \tau r_j(\mathbf{n}, T). \quad (6)$$

Здесь T – температура, К; n_j – количество j -го компонента, моль (\mathbf{n} – это вектор, состоящий из количеств всех N компонентов); r_j – скорость химической реакции, связанной с j -ым компонентом; h – удельная энтальпия, Дж/моль; τ – время пребывания реагентов в реакционной зоне; α – обобщенный коэффициент теплопередачи. Индекс 0 относится к входящим потокам. Уравнения (5) и (6) обычно используются для исследования стационарных состояний проточных реакторов идеального перемешивания [20].

Скорость реакции в многокомпонентной системе является сложной функцией состава и температуры. Для упрощения расчетов мы используем приближение брутто-реакции: считаем, что в реакционной зоне протекает медленная реакция термического разложения биомассы, которая имеет первый порядок по сырью и аррениусовскую зависимость от температуры. Такое приближение часто используется для описания процессов пиролиза и газификации твердых топлив (например, см. [36]). Скорости остальных реакций считаем достаточно высокими, чтобы применять для них квазиравновесное приближение. В этом случае можно в качестве переменной, характеризующей протекание реакции, использовать степень конверсии биомассы ξ :

$$\xi = \frac{\tau K}{1 + \tau K}. \quad (7)$$

Здесь K – коэффициент скорости брутто-реакции пиролиза:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R_g T}\right). \quad (8)$$

Значения коэффициентов выбраны следующим образом: $K_0 = 10^7 \text{ с}^{-1}$; $E_a = 110 \text{ кДж/моль}$; универсальная газовая постоянная R_g равна 8.314 Дж/моль/К . Тогда, рассчитывая с помощью (7) и (8) значения ξ при заданных значениях времени пребывания и температуры реакции, можно определить элементный состав летучих веществ, который далее распределяется по молекулярным формам в соответствии с условиями химического равновесия:

$$\mathbf{n}^{eq} = \underset{\mathbf{n}}{\operatorname{argmin}} G(\mathbf{n}, T), \quad (9)$$

$$\mathbf{A}\mathbf{n} = \mathbf{b}(\xi), \quad (10)$$

$$n_j \geq 0 \quad \forall j. \quad (11)$$

Здесь \mathbf{A} – матрица элементного состава, \mathbf{b} – вектор количества элементов, G – свободная энергия Гиббса:

$$G(\mathbf{n}) = \sum_j^N \mu_j(\mathbf{n}, T) n_j, \quad (12)$$

где μ_j – это химический потенциал j -го компонента. Тогда уравнение теплового баланса в реакторе можно переписать следующим образом:

$$\sum_j^N (h_j^{eq} n_j^{eq} - h_j^0 n_j^0) = \tau \alpha (T^0 - T). \quad (13)$$

Связь между \mathbf{n}^{eq} и \mathbf{n}^0 в общем случае не выражается явными аналитическими зависимостями, поэтому задача решается численно. Газообразные компоненты, которые учитываются в расчетах, это O_2 , N_2 , CO_2 , H_2O , H_2 , CO , CH_4 (добавление других компонентов не приводит к существенному изменению решения). Кроме них, рассматриваются конденсированные компоненты: исходное топливо, углерод и влага. Значения n^0 берутся в расчете на 1 кг топлива. Термодинамические свойства веществ (μ , h) взяты из справочника [37]. Технический состав топлива: влажность 20%, содержание летучих веществ 85% (на сухую массу). Элементный состав (на сухую массу): 49% углерода, 6% водорода, 43% кислорода, 2% азота. Давление считается постоянным (равно 1 атм). Задача условной оптимизации (9-12) решается методом оптимального спуска [22]. Использование термодинамической модели позволяет учесть зависимость теплового эффекта реакций пиролиза и горения от условий теплообмена и стехиометрического фактора (в нашей предыдущей работе [19] предельная температура горения была варьруемым параметром).

В стационарном состоянии время пребывания реагентов в зоне окисления определяется скоростью движения газа и шириной зоны окисления:

$$u = \frac{\delta}{\tau}. \quad (14)$$

Здесь u – линейная скорость движения газа (скоростью движения фронта горения можно, как правило, пренебречь), δ - ширина зоны окисления. С ростом температуры плотность газа уменьшается, а значит, скорость движения возрастает:

$$u = u^0 \frac{T}{T^0}. \quad (15)$$

Комбинируя (14) и (15), получим выражение для времени пребывания реагентов в реакционной зоне:

$$\tau = \frac{\delta T^0}{u^0 T}$$

Это соотношение применимо, если можно пренебречь газовой выделением в реакционной зоне. В случае горения или газификации с воздушным дутьем такое приближение дает погрешность порядка 40-50%: даже когда объем продуктов превышает объем окислителя в несколько раз, разбавление азотом снижает величину эффекта.

Коэффициент теплопроводности можно записать следующим образом [38]:

$$\lambda = \lambda^0 + \frac{16}{3} \pi \sigma d_p \varepsilon T^3.$$

Тогда эффективный коэффициент теплоотдачи в (13) определяется из (2):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta^2}.$$

Толщина реакционной зоны связана с размером частиц. В настоящей работе принимается, что δ равна $3d_p$ (в работах [39-41] на основе экспериментальных и теоретических иссле-

дований дается значение от 1 до 5 размеров частиц). Таким образом, все коэффициенты в уравнении теплового баланса определены. Удельный расход воздуха (стехиометрическое соотношение) варьируется: в простейшем случае он определяется скоростью течения воздуха, однако при неполном горении может быть меньше стехиометрического [42].

Решение уравнения (13) находится графическим методом: при выбранной скорости течения воздуха для всего диапазона температур (300-2200 К) определяются равновесные составы, химические источники теплоты и кондуктивный тепловой поток из реакционной зоны к свежему топливу. Тогда, построив на одном графике обе величины, можно определить точки пересечения – они соответствуют стационарным решениям. Расчеты показывают, что всегда существует тривиальное решение, соответствующее режиму без горения. В области высоких температур есть, как правило, два стационарных решения, одно из которых неустойчиво (знаки производных от слагаемых теплового баланса по температуре положительны). Высокотемпературное решение является устойчивым – его характеристики и будут использоваться при сопоставлении разных режимов. В расчетах помимо температуры варьируются также скорость подачи воздуха (от 10^{-3} до 10^2 м/с) и удельный расход воздуха на окисление топлива (от 0.5 до 6.5 кг/кг).

На рис. 1 показаны разные варианты взаимного расположения кривых тепловыделения и теплопотерь (удельный расход воздуха 4 кг/кг).

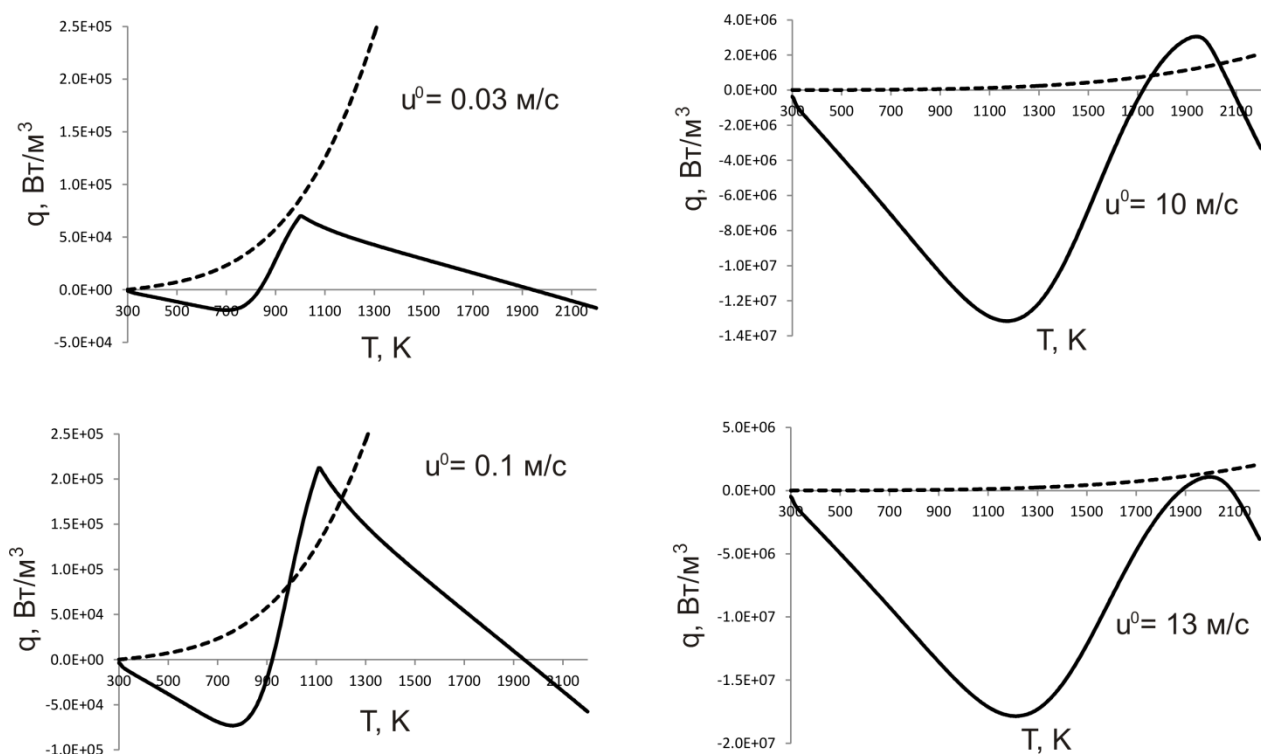


Рис. 1. Численное решение уравнения (13) для разных значений скорости воздуха u^0 .

При малых скоростях фильтрации время пребывания реагентов в зоне реакции велико, поэтому кривая теплопотерь оказывается выше кривой тепловыделения. С ростом скорости фильтрации происходит касание кривых, что соответствует нижней критической скорости фильтрации. Между критическими значениями скорости фильтрации кривые тепловыделения и теплопотерь пересекаются в двух точках, которые соответствуют стационарным состояниям. Устойчивым является состояние с большей температурой. При малых временах пребывания реагентов в зоне реакции кривая тепловыделения оказывается ниже кривой теплопотерь из-за меньшей полноты протекания реакции. Отметим, что расчеты проводились без учета теплопотерь в поперечном потоке направлении: теплота отводится из зоны реакции

только в холодную область слоя. Диффузионный подвод окислителя не учитывается: считаем, что открытая граница слоя находится достаточно далеко от фронта реакции (хотя в некоторых случаях слоевое горение создает достаточную тягу для свободно-конвективного подвода окислителя [12]).

2. Результаты расчетов. Расчетные зависимости температуры на фронте реакции от скорости течения воздуха имеют форму замкнутых кривых, верхняя часть которой соответствует устойчивой ветви решений (такие кривые названы «изолами» в работе [43]). В работе [19] на примере более простой модели было показано, что для размыкания такой кривой требуется подогрев воздуха. В настоящей работе влияние температуры воздуха не рассматривается, поэтому для всех случаев область устойчивых режимов имеет границы при больших скоростях воздуха (срыв горения из-за малого времени пребывания) и низких скоростях воздуха (срыв горения из-за больших теплотерь). Расположение кривых, соответствующих стационарным решениям (13), в координатах «температура – скорость воздуха – удельное потребление воздуха» представлено на рис. 2, из которого видно, что расчетные кривые находятся на оболочке некоторой области, имеющей форму, близкую к выпуклой. При этом устойчивые стационарные решения находятся только на одной стороне этой области, соответствующей большим температурам.

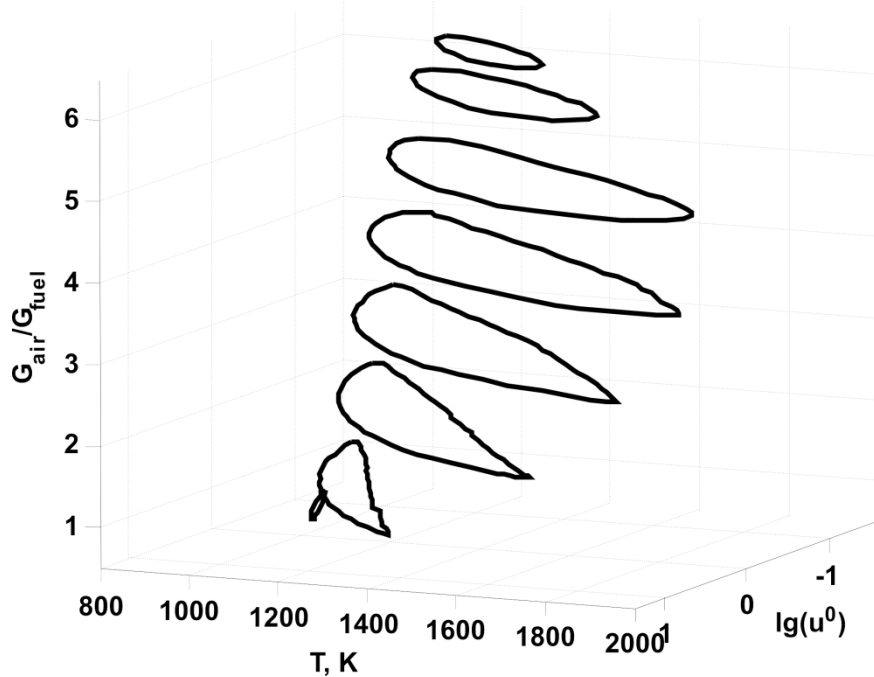


Рис. 2. Стационарные решения уравнения (13) для разных удельных расходов окислителя.

При малых значениях удельного потребления воздуха (до 0.5 кг/кг, что близко к нижней границе устойчивости) наблюдается горение с температурой до 1000 К, т.е. происходит тление. С ростом удельного расхода воздуха происходит резкое расширение диапазона допустимых скоростей фильтрации воздуха и увеличение максимальной температуры. Минимальные скорости фильтрации воздуха оказываются в диапазоне от 1 до 10 см/с, что лучше соответствует экспериментальным данным [39-41]. В предыдущей работе [19] в приближении постоянного теплового эффекта были получены крайние низкие минимальные скорости фильтрации: в настоящей работе величина теплового эффекта зависит от степени конверсии топлива (хотя все равно отличается от реальной), поэтому при низкой температуре горения эндотермические процессы, такие как сушка и пиролиз, требуют большей скорости фильтрации для поддержания стационарного режима. Максимальные скорости подачи воздуха соот-

ветствуют низкому удельному потреблению окислителя, когда полная конверсия топлива не достигается: эти режимы соответствуют выгоранию летучих веществ [44, 45].

В работах [39-41] максимальная скорость фильтрации составляет около 1 м/с. На рис. 3 видно, что удельный расход воздуха зависит от скорости фильтрации немонотонно. Каждому критическому значению скорости фильтрации могут соответствовать два значения удельного расхода воздуха: в области низких удельных расходов тепловыделение происходит в основном за счет горения летучих, в области высоких значений происходит окисление углеродного остатка. Режимы газификации, близкие к границе полной конверсии углерода, соответствует наибольшей температуре (в наших расчетах при удельном расходе воздуха 4 кг/кг), однако максимальная допустимая скорость фильтрации достигается при меньших удельных расходах воздуха (ок. 2 кг/кг). Максимальная скорость фильтрации зависит от выбранных эффективных кинетических параметров, т.е. для более точной оценки может потребоваться их корректировка [19]. Поскольку имеющиеся данные не позволяют выбрать единый набор кинетических коэффициентов для реакционных брутто-схем [46, 47], можно сделать вывод о скорее качественном соответствии расчетов наблюдаемым явлениям.

Приближенность модели также приводит к тому, что связь между скоростью подачи воздуха и его удельным расходом в реакциях окисления не может быть установлена, поэтому оба параметра рассматриваются как независимые. В реальных процессах конверсии биомассы эти параметры могут быть связаны между собой, причем эта связь не определяется простыми стехиометрическими соотношениями. Как правило, имеется широкий набор возможных конечных состояний, достижимость которых определяется кинетическими факторами. В этом случае можно использовать отбор режимов, например, по эмпирическим критериям: в некоторых случаях процессы газификации демонстрируют довольно устойчивое поведение, преимущественно оказываясь вблизи области параметров, соответствующих границе образования механического недожога [48]. В нестационарных условиях могут наблюдаться процессы пирогазификации [49].

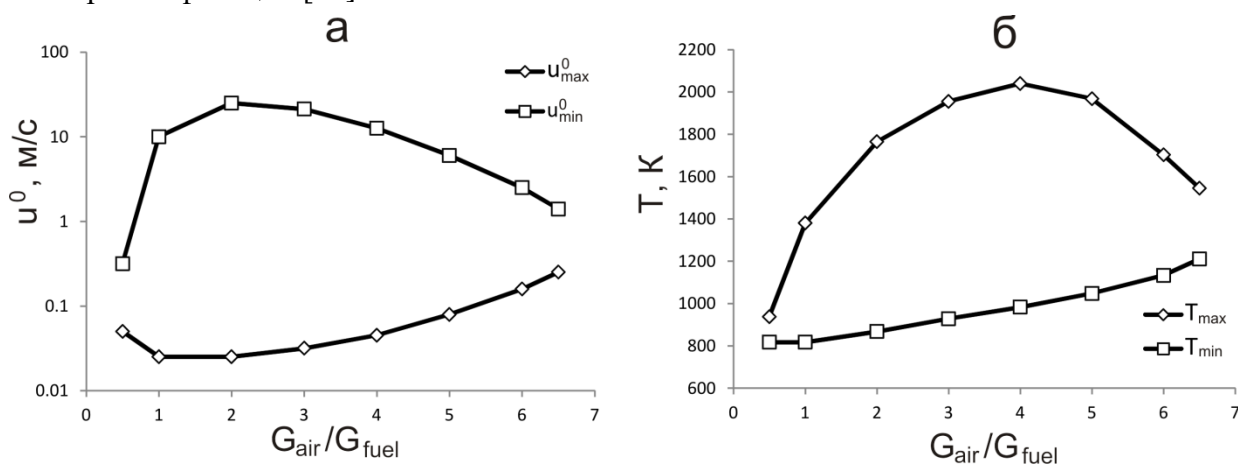


Рис. 3. Зависимость предельных значений скорости воздуха (а) и температуры горения (б) от удельного расхода окислителя.

Другим недостатком модели является пренебрежение процессами внутри топливных частиц. При резких градиентах температуры, которые наблюдаются при слоевом горении, частицы реагируют неоднородно по объему и по поверхности. В таких условиях скорость реакции определяется скоростью процессов переноса в частицах. Для учета этих эффектов требуются более детальные модели [7].

Выводы. Предложенная модель, полученная в результате сведения задачи слоевого горения к реактору идеального перемешивания, позволяет качественно воспроизвести условия затухания при низких скоростях течения воздуха. Квазиравновесное приближение позволяет

упростить оценку слагаемого в тепловом балансе, отвечающего за тепловыделение. Расчеты показывают, что минимальная скорость течения воздуха, обеспечивающая стационарное горение, составляет от 2.5 до 25 см/с в зависимости от удельного потребления окислителя в реакциях окисления. Максимальная температура достигается при удельном потреблении окислителя ниже стехиометрического. Максимальная допустимая скорость подачи воздуха достигается при еще меньшем удельном потреблении окислителя, т.е. соответствует горению летучих веществ, а не полной конверсии топлива (поскольку стадия газификации является существенно эндотермической).

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект №19-08-00744).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balakotaiah V., Luss D. Global analysis of the multiplicity features of multi-reaction lumped-parameter systems // *Chemical Engineering Science*. 1984. V. 39. № 5. Pp. 865-881. DOI: 10.1016/0009-2509(84)85056-3.
2. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Bugaeva K.A., Taburchinov R.I. The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases // *Combustion Science and Technology*. 2018. V. 190. № 4. Pp. 663-686. DOI: 10.1080/00102202.2017.1404997.
3. Panahi A., Vorobiev N., Schiemann M., Tarakcioglu M., Delichatsios M., Levendis Y.A. Combustion details of raw and torrefied biomass fuel particles with individually-observed size, shape and mass // *Combustion and Flame*. 2019. V. 207. Pp. 327-341. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.06.009.
4. El-Sayed S.A. Ignition of a Pyrolysis Wooden Particle Based on the Thermal Explosion Theory // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2018. V. 42. Pp. 317-327. DOI: 10.1007/s40997-017-0099-8.
5. Peters B. Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual particles // *Combustion and Flame*. 2002. V. 131. Pp. 132-146. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00393-0.
6. Sommariva S., Granan R., Maffei T., Pierucci S., Ranzi E. A kinetic approach to the mathematical model of fixed bed gasifiers // *Computers & Chemical Engineering*. 2011. V. 35. № 5. Pp. 928-935. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.036.
7. Донской И.Г. Математическое моделирование термического разложения древесных частиц в продуваемом слое // *Вычислительные технологии*. 2018. Т. 23. № 6. С. 14-24. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.003.
8. Restuccia F., Masek O., Hadden R.M., Rein G. Quantifying self-heating ignition of biochar as a function of feedstock and the pyrolysis reactor temperature // *Fuel*. 2019. V. 236. Pp. 201-213. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.141.
9. Karim M.R., Naser J. Numerical modelling of solid biomass combustion: difficulties in initiating the fixed bed combustion // *Energy Procedia*. 2017. V. 110. Pp. 390-395. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.158.
10. Peters B. Classification of combustion regimes in a packed bed of particles based on the relevant time and length scales // *Combustion and Flame*. 1999. V. 116. № 1-2. Pp. 297-301. DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00048-0.
11. Ohlemiller T.J. Modeling of smoldering combustion propagation // *Progress in Energy and Combustion Science*. 1985. V. 14. Pp. 277-310. DOI: 10.1016/0360-1285(85)90004-8.

12. Rebaque V., Ertesvag I.S., Mikalsen R.F., Steen-Hansen A. Experimental study of smouldering in wood pellets with and without air draft // *Fuel*. 2020. V. 264. Paper № 116806. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116806.
13. Амелин И.И., Салганский Е.А., Волкова Н.Н., Жолудев А.Ф., Алексеев А.П., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Область существования стационарной волны фильтрационного горения в шихте с малым содержанием углерода // *Известия АН. Серия химическая*. 2011. № 6. С. 1125-1132.
14. Салганский Е.А., Полианчик Е.В., Манелис Г.Б. Моделирование фильтрационного горения твердого пиролизующегося топлива // *Физика горения и взрыва*. 2013. Т. 49. № 1. С. 45-61.
15. Lutsenko N.A., Levin V.A. Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media // *Combustion Science and Technology*. 2014. V. 186. № 10-11. Pp. 1410-1421. DOI: 10.1080/00102202.2014.934611.
16. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // *Combustion Theory and Modelling*. 2018. V. 22. № 2. Pp. 359-377. DOI: 10.1080/13647830.2017.1406617.
17. Ranzi E., Faravelli T., Manenti F. Pyrolysis, Gasification, and Combustion of Solid Fuels // *Advances in Chemical Engineering*. 2016. V. 49. Pp. 1-94. DOI: 10.1016/bs.ache.2016.09.001.
18. Horton S.R., Mohr R.J., Zhang Y., Petrocelli F.P., Klein M.T. Molecular-level kinetic modeling of biomass gasification // *Energy & Fuels*. 2016. V. 30. Pp. 3906-3916. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01988.
19. Донской И.Г. Оценка пределов устойчивого слоевого горения в приближении идеального перемешивания зоны окисления // *Вестник технологического университета*. 2020. Т. 23. № 12. С. 135-140.
20. Snegirev A.Yu. Perfectly stirred reactor model to evaluate extinction of diffusion flame // *Combustion and Flame*. 2015. V. 162. № 10. Pp. 3622-3631. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.06.019.
21. Алдушин А.П. Макрокинетический анализ "сверхадиабатического" реактора идеального смешения // *ДАН*. 2011. Т. 436. № 2. С. 203-206.
22. Каганович Б.М., Кейко А.В., Шаманский В.А., Ширкалин И.А., Зароднюк М.С. Технология термодинамического моделирования. Редукция моделей движения к моделям покоя. Новосибирск: Наука. 2010. 236 с.
23. Попков Ю.С. Позитивные динамические системы с энтропийным оператором // *Автоматика и телемеханика*. 2003. № 3. С. 104-113.
24. Donskoy I.G., Shamansky V.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. № 3. Pp. 529-559. DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505.
25. Kangas P., Koukkari P., Hupa M. Modeling Biomass Conversion during Char Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction by Applying Constrained Local Thermodynamic Equilibrium // *Energy Fuels*. 2014. V. 28. № 10. Pp. 6361-6370. DOI: 10.1021/ef501343d.
26. Mendiburu A.Z., Carvalho J.A. Jr., Zanzi R., Coronado C.R., Silveira J.L. Thermochemical equilibrium modeling of a biomass downdraft gasifier: Constrained and unconstrained non-stoichiometric models // *Energy*. 2014. V. 71. Pp. 624-637. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.010.

27. Gomez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. V. 36. Pp. 444-509. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.
28. Gorban A.N., Karlin I.V. Method of invariant manifolds for chemical kinetics // *Chemical Engineering Science*. 2003. V. 58. Pp. 4751-4768. DOI: 10.1016/j.ces.2002.12.001.
29. Чуханов З.Ф. Тепловой режим горения и газификации слоя твердого топлива // *ДАН СССР*. 1944. Т. 44. № 7. С. 297-301.
30. Колесникова Ю.Ю., Кислов В.М., Салганский Е.А. Влияние теплотерь на характеристики фильтрационного горения твердого органического топлива // *Химическая физика*. 2016. Т. 35. № 9. С. 53-58.
31. Kurdyumov V.N., Gubernov V.V. Dynamics of combustion waves in narrow samples of solid energetic material: Impact of radiative heat losses on chaotic behavior and dynamical extinction phenomenon // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 349-358. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.014.
32. Zavala E.Q., Chapiro G. Classification of the traveling wave solutions for filtration combustion considering thermal losses // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 416-424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.017.
33. Манелис Г.Б., Глазов С.В., Салганский Е.А., Ламперт Д.Б. Автоволновые процессы при фильтрационном горении в противоточных системах // *Успехи химии*. 2012. Т. 81. № 9. С. 855-873.
34. Алдушин А.П., Ивлева Т.П. Моделирование гидродинамической неустойчивости фильтрационного режима распространения фронта горения в пористой среде // *ФГВ*. 2015. Т. 51. № 1. С. 125-134.
35. Nakamura M., Zhang H., Millrath K., Themelis N.J. Modeling of Waste-to-Energy Combustion With Continuous Variation of the Solid Waste Fuel // *Proceedings of the 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'03)*. November 15-21. 2003. Washington DC, USA. Paper № IMECE2003-55342. Pp. 69-78. DOI: 10.1115/IMECE2003-55342.
36. Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016. V. 53. Pp. 41-79. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.002.
37. McBride B.J., Zehe M.J., Gordon S. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species (NASA\TP-2002-211556). Cleveland: Glenn Research Center. 2002. 296 p.
38. Попов Ю.А. Лучистая теплопроводность в слое с большой концентрацией частиц // *ИФЖ*. 1978. Т. 34. № 4. С. 703-705.
39. Porteiro J., Pratino D., Miguez J.L., Granada E., Moran J., Collazo J. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass // *Combustion and Flame*. 2012. V. 159. Pp. 1296-1302. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.10.007.
40. Porteiro J., Pratino D., Collazo J., Granada E., Moran J., Miguez J.L. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor // *Fuel*. 2010. V. 89. Pp. 26-35. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.01.024.
41. Fatehi M., Kaviany M. Adiabatic reverse combustion in a packed bed // *Combustion and Flame*. 1994. V. 99. Pp. 1-17. DOI: 10.1016/0010-2180(94)90078-7.
42. Глазов С.В., Кислов В.М., Салганский Е.А. Скорость горения твердых топлив в сверхадиабатическом режиме // *Журнал прикладной химии*. 2018. Т. 91. № 10. С. 1396.
43. Hlavacek V., Van Rompay P. On the birth and death of isolas // *Chemical Engineering Science*. 1981. V. 36. № 10. Pp. 1730-1731. DOI: 10.1016/0009-2509(81)80019-X.

44. Gupta V., Torero J.L., Hidalgo J.P. Burning dynamics and in-depth flame spread of wood cribs in large compartment fires // *Combustion and Flame*. 2021. V. 228. Pp. 42-56. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.031.
45. Tanui J.K., Kioni P.N., Mirre T., Nowitzki M., Todorova D.A. Application of CFD-DEM method in modeling of wood combustion in a fixed bed // *Bulgarian Chemical Communications*. 2020. V. 52. Pp. 396-403.
46. Di Blasi C. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars // *Progress in energy and combustion science*. 2009. V. 35. Pp. 121-140. DOI: 10.1016/j.pecs.2008.08.001.
47. Anca-Couce A., Tsekos C., Retschitzegger S., Zimbardi F., Funke A., Banks S., Kraia T., Marques P., Scharler R., de Jong W., Kienzi N. Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin // *Fuel*. 2020. V. 276. Paper № 118002. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118002.
48. Svishchev D.A., Kozlov A.N., Donskoy I.G., Ryzhkov A.F. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification // *Fuel*. 2016. V. 168. Pp. 91-106. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.11.066.
49. Jaganathan V.M., Varunkumar S. A novel self-sustained single step process for synthesizing activated char from ligno-cellulosic biomass // *Fuel Processing Technology*. 2020. V. 208. Paper № 106516. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106516.

UDK 662.611; 544.45

NUMERICAL ESTIMATION OF THERMAL STABILITY BOUNDARIES OF FIXED BED BIOMASS COMBUSTION USING LOCAL CHEMICAL EQUILIBRIUM APPROXIMATION

Igor G. Donskoy

Cand. Sci., Senior Researcher in Laboratory of Thermodynamics,

e-mail: donskoy.chem@mail.ru

Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
664033, Russia, Irkutsk, Lermontova st., 130

Abstract. The article investigates the dependence of the stationary combustion temperature of layer combustion of biomass on the feed rate and specific consumption of air blast. For this, the stationary heat balance equation, together with the simplest kinetic equation for a chemical reaction, is solved over a wide range of parameters. For a numerical solution, a number of assumptions are introduced (a narrow reaction zone, preferential heat removal by radiant heat conduction, equilibrium composition of oxidation products). The calculation results give the boundary values of the consumption and stoichiometric parameters at which stable combustion is possible.

Keywords: mathematical modelling, fixed bed combustion, thermal stability, thermodynamic modelling.

Acknowledgements: The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19-08-00744).

REFERENCES

1. Balakotaiah V., Luss D. Global analysis of the multiplicity features of multi-reaction lumped-parameter systems // *Chemical Engineering Science*. 1984. V. 39. № 5. Pp. 865-881. DOI: 10.1016/0009-2509(84)85056-3.

2. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Bugaeva K.A., Taburchinov R.I. The Conditions and Characteristics of Wood Particles Ignition in the Stream of the High Temperature Gases // *Combustion Science and Technology*. 2018. V. 190. № 4. Pp. 663-686. DOI: 10.1080/00102202.2017.1404997.
3. Panahi A., Vorobiev N., Schiemann M., Tarakcioglu M., Delichatsios M., Levendis Y.A. Combustion details of raw and torrefied biomass fuel particles with individually-observed size, shape and mass // *Combustion and Flame*. 2019. V. 207. Pp. 327-341. DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.06.009.
4. El-Sayed S.A. Ignition of a Pyrolysis Wooden Particle Based on the Thermal Explosion Theory // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. 2018. V. 42. Pp. 317-327. DOI: 10.1007/s40997-017-0099-8.
5. Peters B. Measurements and application of a discrete particle model (DPM) to simulate combustion of a packed bed of individual particles // *Combustion and Flame*. 2002. V. 131. Pp. 132-146. DOI: 10.1016/S0010-2180(02)00393-0.
6. Sommariva S., Granan R., Maffei T., Pierucci S., Ranzi E. A kinetic approach to the mathematical model of fixed bed gasifiers // *Computers & Chemical Engineering*. 2011. V. 35. № 5. Pp. 928-935. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.036.
7. Donskoy I.G. Matematicheskoye modelirovaniye termicheskogo razlozheniya drevesnykh chastits v produvayemom sloye [Mathematical modelling of woody particles pyrolysis in a fixed bed] // *Vychislitel'nyye tekhnologii = Computational technologies*. 2018. V. 23. № 6. Pp. 14-24. DOI: 10.25743/ICT.2018.23.6.003 (in Russian)
8. Restuccia F., Masek O., Hadden R.M., Rein G. Quantifying self-heating ignition of biochar as a function of feedstock and the pyrolysis reactor temperature // *Fuel*. 2019. V. 236. Pp. 201-213. DOI: 10.1016/j.fuel.2018.08.141.
9. Karim M.R., Naser J. Numerical modelling of solid biomass combustion: difficulties in initiating the fixed bed combustion // *Energy Procedia*. 2017. V. 110. Pp. 390-395. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.158.
10. Peters B. Classification of combustion regimes in a packed bed of particles based on the relevant time and length scales // *Combustion and Flame*. 1999. V. 116. № 1-2. Pp. 297-301. DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00048-0.
11. Ohlemiller T.J. Modeling of smoldering combustion propagation // *Progress in Energy and Combustion Science*. 1985. V. 14. Pp. 277-310. DOI: 10.1016/0360-1285(85)90004-8
12. Rebaque V., Ertesvag I.S., Mikalsen R.F., Steen-Hansen A. Experimental study of smouldering in wood pellets with and without air draft // *Fuel*. 2020. V. 264. Paper № 116806. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116806.
13. Amelin I.I., Salganskiy Ye.A., Volkova N.N., Zholudev A.F., Alekseyev A.P., Polianchik Ye.V., Manelis G.B. Oblast' sushchestvovaniya statsionarnoy volny fil'tratsionnogo gorennya v shikhte s malym sodержaniyem ugleroda [Parametric domain of the stationary filtration combustion wave in the charge with a low carbon content] // *Izvestiya AN. Seriya khimicheskaya = Izvestiya AN. Chemical series*. 2011. V. 60. Pp. 1150–1157. DOI: 10.1007/s11172-011-0180-1 (in Russian)
14. Salganskiy Ye.A., Polianchik Ye.V., Manelis G.B. Modelirovaniye fil'tratsionnogo gorennya tverdogo pirolizuyushchegosya topliva [Modeling filtration combustion of a pyrolyzing solid fuel] // *Fizika gorennya i vzryva = Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2013. V. 49. Pp. 38-52. DOI: 10.1134/S001050821301005X (in Russian)

15. Lutsenko N.A., Levin V.A. Effect of Gravity Field and Pressure Difference on Heterogeneous Combustion in Porous Media // *Combustion Science and Technology*. 2014. V. 186. № 10-11. Pp. 1410-1421. DOI: 10.1080/00102202.2014.934611.
16. Lutsenko N.A. Numerical model of two-dimensional heterogeneous combustion in porous media under natural convection or forced filtration // *Combustion Theory and Modelling*. 2018. V. 22. № 2. Pp. 359-377. DOI: 10.1080/13647830.2017.1406617.
17. Ranzi E., Faravelli T., Manenti F. Pyrolysis, Gasification, and Combustion of Solid Fuels // *Advances in Chemical Engineering*. 2016. V. 49. Pp. 1-94. DOI: 10.1016/bs.ache.2016.09.001.
18. Horton S.R., Mohr R.J., Zhang Y., Petrocelli F.P., Klein M.T. Molecular-level kinetic modeling of biomass gasification // *Energy & Fuels*. 2016. V. 30. Pp. 3906-3916. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b01988.
19. Donskoy I.G. Otsenka predelov ustoychivogo sloyevogo gorenija v priblizhenii ideal'nogo peremeshivaniya zony okisleniya [Estimation of stability boundaries of fixed bed combustion using perfect stirred reactor approximation] // *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of the Technological University*. 2020. V. 23. No 12. Pp. 135-140. (in Russian)
20. Snegirev A.Yu. Perfectly stirred reactor model to evaluate extinction of diffusion flame // *Combustion and Flame*. 2015. V. 162. № 10. Pp. 3622-3631. DOI: 10.1016/j.combustflame.2015.06.019.
21. Aldushin A.P. Makrokineticheskiy analiz "sverkhadiabatcheskogo" reaktora ideal'nogo smesheniya [Macrokinetic analysis of a superadiabatic well-stirred tank reactor] // *DAN = Doklady Physical Chemistry*. 2011. V. 436. Pp. 1-4. DOI: 10.1134/S0012501611010015 (in Russian)
22. Kaganovich B.M., Keyko A.V., Shamanskiy V.A., Shirkalin I.A., Zarodnyuk M.S. Tekhnologiya termodinamicheskogo modelirovaniya. Reduktsiya modeley dvizheniya k modelyam pokoya [Thermodynamic modeling technology. Reduction of motion models to rest models]. Novosibirsk: Nauka= Science. 2010. 236 p. (in Russian)
23. Popkov YU.S. Pozitivnyye dinamicheskiye sistemy s entropiynym operatorom [Positive Dynamic Systems with the Entropy Operator] // *Avtomatika i telemekhanika = Automation and Remote Control*. 2003. V. 64. Pp. 439-447. DOI: 10.1023/A:1023265609028 (in Russian)
24. Donskoy I.G., Shamansky V.A., Kozlov A.N., Svishchev D.A. Coal gasification process simulations using combined kinetic-thermodynamic models in one-dimensional approximation // *Combustion Theory and Modelling*. 2017. V. 21. № 3. Pp. 529-559. DOI: 10.1080/13647830.2016.1259505.
25. Kangas P., Koukkari P., Hupa M. Modeling Biomass Conversion during Char Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction by Applying Constrained Local Thermodynamic Equilibrium // *Energy Fuels*. 2014. V. 28. № 10. Pp. 6361-6370. DOI: 10.1021/ef501343d.
26. Mendiburu A.Z., Carvalho J.A. Jr., Zanzi R., Coronado C.R., Silveira J.L. Thermochemical equilibrium modeling of a biomass downdraft gasifier: Constrained and unconstrained non-stoichiometric models // *Energy*. 2014. V. 71. Pp. 624-637. DOI: 10.1016/j.energy.2014.05.010.
27. Gomez-Barea A., Leckner B. Modeling of biomass gasification in fluidized bed // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2010. V. 36. Pp. 444-509. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.12.002.

28. Gorban A.N., Karlin I.V. Method of invariant manifolds for chemical kinetics // *Chemical Engineering Science*. 2003. V. 58. Pp. 4751-4768. DOI: 10.1016/j.ces.2002.12.001.
29. Chukhanov Z.F. Teplovoj rezhim gorenija i gasifikatsii sloja tverdogo topliva [Thermal regime of combustion and gasification of a layer of solid fuel] // *DAN SSSR = Doklady USSR*. 1944. V. 44. № 7. Pp. 297-301. (in Russian)
30. Kolesnikova YU.YU., Kislov V.M., Salganskiy Ye.A. Vliyaniye teplopoter' na kharakteristiki fil'tratsionnogo gorenija tverdogo organicheskogo topliva [Influence of the heat loss intensity on the characteristics of the filtration combustion of solid organic fuels] // *Khimicheskaya fizika = Chemical Physics*. 2016. V. 10. Pp. 791-795. DOI: 10.1134/S1990793116050043 (in Russian)
31. Kurdyumov V.N., Gubernov V.V. Dynamics of combustion waves in narrow samples of solid energetic material: Impact of radiative heat losses on chaotic behavior and dynamical extinction phenomenon // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 349-358. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.014.
32. Zavala E.Q., Chapiro G. Classification of the traveling wave solutions for filtration combustion considering thermal losses // *Combustion and Flame*. 2020. V. 219. Pp. 416-424. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.06.017.
33. Manelis G.B., Glazov S.V., Salgansky E.A., Lempert D.B. Avtovolnovyye protsessy pri fil'tratsionnom gorenii v protivotochnykh sistemakh [Autowave processes in the filtration combustion in counterflow systems] // *Uspekhi khimii = Russ. Chem. Rev.* 2012. V. 81. № 9. Pp. 855-873. DOI: 10.1070/RC2012v081n09ABEH004279 (in Russian)
34. Aldushin A.P., Ivleva T.P. Modelirovaniye gidrodinamicheskoy neustoychivosti fil'tratsionnogo rezhima rasprostraneniya fronta gorenija v poristoy srede [Simulation of the hydrodynamic instability of a filtration combustion wave in a porous medium] // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2015. V. 51. № 1. Pp. 107-115. DOI: 10.1134/S0010508215010116 (in Russian)
35. Nakamura M., Zhang H., Millrath K., Themelis N.J. Modeling of Waste-to-Energy Combustion With Continuous Variation of the Solid Waste Fuel // *Proceedings of the 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'03)*. November 15-21, 2003. Washington DC, USA. Paper № IMECE2003-55342. Pp. 69-78. DOI: 10.1115/IMECE2003-55342.
36. Anca-Couce A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2016. V. 53. Pp. 41-79. DOI: 10.1016/j.pecs.2015.10.002.
37. McBride B.J., Zehe M.J., Gordon S. NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species (NASA\TP-2002-211556). Cleveland: Glenn Research Center. 2002. 296 p.
38. Popov Yu.A. Luchistaja teploprovodnost' v sloe s bol'shoj kontsentratsiej chastits [Radiant thermal conductivity in a layer with a high concentration of particles] // *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*. 1978. V. 34. № 4. Pp. 703-705 (in Russian)
39. Porteiro J., Pratino D., Miguez J.L., Granada E., Moran J., Collazo J. Study of the reaction front thickness in a counter-current fixed-bed combustor of a pelletised biomass // *Combustion and Flame*. 2012. V. 159. Pp. 1296-1302. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.10.007.
40. Porteiro J., Pratino D., Collazo J., Granada E., Moran J., Miguez J.L. Experimental analysis of the ignition front propagation of several biomass fuels in a fixed-bed combustor // *Fuel*. 2010. V. 89. Pp. 26-35. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.01.024.

41. Fatehi M., Kaviany M. Adiabatic reverse combustion in a packed bed // *Combustion and Flame*. 1994. V. 99. Pp. 1-17. DOI: 10.1016/0010-2180(94)90078-7.
42. Glazov S.V., Kislov V.M., Salganskiy Ye.A. Skorost' goreniya tverdykh topliv v sverkhadiabatcheskom rezhime [Combustion rate of solid fuels in the superadiabatic mode] // *Zhurnal prikladnoy khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*. V. 91. № 10. Pp. 1581-1587. DOI: 10.1134/S1070427218100038.
43. Hlavacek V., Van Rompay P. On the birth and death of isolas // *Chemical Engineering Science*. 1981. V. 36. №. 10. Pp. 1730-1731. DOI: 10.1016/0009-2509(81)80019-X.
44. Gupta V., Torero J.L., Hidalgo J.P. Burning dynamics and in-depth flame spread of wood cribs in large compartment fires // *Combustion and Flame*. 2021. V. 228. Pp. 42-56. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.031.
45. Tanui J.K., Kioni P.N., Mirre T., Nowitzki M., Todorova D.A. Application of CFD-DEM method in modeling of wood combustion in a fixed bed // *Bulgarian Chemical Communications*. 2020. V. 52. Pp. 396-403.
46. Di Blasi C. Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars // *Progress in energy and combustion science*. 2009. V. 35. Pp. 121-140. DOI: 10.1016/j.peccs.2008.08.001.
47. Anca-Couce A., Tsekos C., Retschitzegger S., Zimbardi F., Funke A., Banks S., Kraia T., Marques P., Scharler R., de Jong W., Kienzi N. Biomass pyrolysis TGA assessment with an international round robin // *Fuel*. 2020. V. 276. Paper № 118002. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118002.
48. Svishchev D.A., Kozlov A.N., Donskoy I.G., Ryzhkov A.F. A semi-empirical approach to the thermodynamic analysis of downdraft gasification // *Fuel*. 2016. V. 168. Pp. 91-106. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.11.066.
49. Jaganathan V.M., Varunkumar S. A novel self-sustained single step process for synthesizing activated char from ligno-cellulosic biomass // *Fuel Processing Technology*. 2020. V. 208. Paper № 106516. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106516.

Статья поступила в редакцию 16.08.2021; одобрена после рецензирования 27.09.2021; принята к публикации 30.09.2021.

The article was submitted 16.08.2021; approved after reviewing 27.09.2021; accepted for publication 30.09.2021.