

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-247-263>

УДК 536.46; 662.758

Численное моделирование слоевого горения двухфазной системы «горючая жидкость – твердое топливо»*

К. В. Доброго¹⁾, И. А. Козначев²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В связи с актуальностью вопросов совершенствования сжигания многокомпонентного и нестандартного топлива, а также для решения ряда экологических задач требуются исследования горения сложных гетерогенных, в частности двухфазных, систем типа «горючая жидкость – твердое топливо». Численно исследуются количественные и качественные особенности горения двух модельных топливных систем, условно соответствующих смесям «опилки – нефть» и «щепа – нефть». Особенностью данных систем является подвижность жидкой фазы, увлекаемой газовым потоком в пористой среде. Рассматривается одномерная плоская задача слоевого горения с поджигом с нижней и верхней сторон слоя. Показано, что для системы с мелкодисперсной твердой фазой (опилки), в силу низкой проницаемости для газов, скорость воздушного дутья относительно невысока, что обуславливает медленное формирование температурного фронта (характерное время – несколько десятков минут). В случае крупнодисперсной твердой фазы (щепа) расход воздуха больше и соответствующее время формирования температурных фронтов меньше (несколько минут). Как для случая мелко-, так и крупнодисперсной твердой фазы при поджиге снизу жидкофазный горючий компонент эвакуируется газовым потоком из горячей зоны раньше, чем формируется фронт горения. Поэтому основные закономерности динамики температурного фронта соответствуют «сухой» горючей системе. При поджиге сверху за время порядка 100 с (при использованных значениях параметров) формируется волна прогрева, распространяющаяся сверху вниз по слою и сопровождающаяся частичным окислением твердого горючего компонента при полном расходовании окислителя. Скорость распространения фронта горения в моделируемых условиях мало отличается при поджиге снизу и сверху. Однако время установления квазистационарной скорости фронта на начальном этапе значительно меньше при поджиге снизу. Результаты, полученные авторами, могут быть использованы для оптимизации слоевого сжигания многофазных топлив, режимных параметров метода внутрислоевого горения при нефтедобыче, а также при исследовании ряда химических технологий.

Ключевые слова: горение, топливо, гетерогенное топливо, фильтрационное горение, неподвижный слой, численное моделирование

Для цитирования: Доброго, К. В. Численное моделирование слоевого горения двухфазной системы «горючая жидкость – твердое топливо» / К. В. Доброго, И. А. Козначев // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 3. С. 247–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-247-263>

Адрес для переписки

Доброго Кирилл Викторович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

Address for correspondence

Dobrego Kirill V.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-42-32
ef@bntu.by

* Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии», подпрограммы «1.2. Эффективные теплофизические процессы и технологии» (задание 2.32).

Numerical Simulation of Two-Phase System of “Combustible Liquid – Solid Fuel” Combustion in a Fixed Bed

K. V. Dobrego¹⁾, I. A. Koznacheev²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Investigation of combustion of complex heterogeneous systems and particularly of two-phase “combustible liquid – solid fuel” systems is topical because of the need to improve combustion of multicomponent and non-standard fuels as well as for resolution of specific ecological problems. The qualitative and quantitative peculiarities of combustion of two model combustible systems, notionally corresponding to the “sawdust – oil” and “wood chips – oil” mixtures are investigated numerically. The main peculiarity of the systems is volatility of the fluid component, being gaseous-flow driven inside porous media. A one-dimensional plain problem of combustion of compact layer with the ignition from the bottom and from the upper side is considered. It is demonstrated that due to low gas permeability of the fine-dispersed solid matrix (sawdust), air flow velocity is relatively low which results in slow formation of the combustion front (the characteristic time is tens of minutes). In case of coarse solid phase (wood chips), airflow rate is higher and corresponding time of temperature fronts formation is smaller (a few minutes). Both for the cases of fine-dispersed and coarse particles solid matrix phase, when set on fire from below, the fluid component is evacuated from the hot zone before the combustion front is formed. Since that, the main characteristics of the temperature front dynamics correspond to “dry” fuel system. In case of upper side ignition the combustion wave is formed at the time of the order of 100 s (when the used magnitudes of parameters are being used again), then it spreads downstream of the layer, accompanied by incomplete oxidation of solid fuel and complete combustion of oxygen. The effect of incomplete solid fuel combustion was noted earlier in the investigations of combustion of lean coal layer and some other systems. The velocity of the combustion wave propagation does not differ much for the cases of upper side and bottom side ignition. But the time of establishing the quasi-stationary velocity of the front to the steady-state value at the initial stage is much less in case of bottom side ignition. The results obtained by the authors can be utilized for optimization of multi-phase fuels combustion in compact layer, the regime parameters of in-situ combustion method of oil recovery increase as well as for improvement of some specific chemical processes.

Keywords: combustion, fuel, heterogeneous fuel, filtration combustion, a fixed bed, numerical simulation

For citation: Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2019) Numerical Simulation of Two-Phase System of “Combustible Liquid – Solid Fuel” Combustion in a Fixed Bed. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (3) 247–263. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-247-263> (in Russian)

Введение

Слоевое сжигание твердого топлива – распространенный способ сжигания в энергетических установках [1, 2]. Его отличают простота организации, небольшие объемы топки, надежность. По сравнению с котлами кипящего слоя – меньший износ и унос золы и материала самой топки.

Классическое слоевое сжигание хорошо исследовано, по крайней мере в технических аспектах [3]. Различают спутную (параллельную), встречную и поперечную схемы подачи топлива и окислителя. При сжигании в слое формируется квазистационарная (при непрерывной подаче топлива) структура тепловых и концентрационных полей, включающая окислительную и восстановительную зоны. Наиболее важными целевыми параметра-

ми процесса являются полнота и экологическая чистота сгорания, высокий термический КПД теплоэнергетической установки в целом.

Классическое топливо для слоевого сжигания – кусковой уголь, щепа, торфобрикеты, древесные топливные гранулы (пеллеты), кусковая древесина. Соответствующие котлы малой и средней мощности широко известны и давно выпускаются в странах СНГ и за рубежом.

Следует отметить, что вопросы слоевого горения твердых топлив достаточно подробно изучены теоретически [4] и экспериментально [5].

В [6] предложена методика расчета прогрева плотного слоя топлива, основанная на аналитических решениях Шумана и Анцелиуса и на экспериментальных исследованиях аэродинамики плотного слоя. Методика позволяет проводить оптимизацию системы подачи твердого топлива в слоевую топку.

Результаты экспериментальных исследований сгорания твердого топлива (каменные и бурые угли, антрациты) в неподвижном слое на колосниковых решетках различной формы представлены в [7]. Измерялись локальный химический состав газообразных продуктов сгорания, расход воздуха, аэродинамическое сопротивление слоя топлива и шлака, температура в слое и температура газов в надслоевом пространстве. Установлено, что для процесса сгорания твердого топлива в неподвижном слое характерна неоднородность, более выраженная для топлив с высокой долей летучих.

В [8] приведены результаты экспериментальных исследований воспламенения и горения твердых биотоплив растительного происхождения (древесные частицы, финиковые косточки), а также продуктов их механической и тепловой обработки (пеллеты, древесный уголь) в температурных условиях, близких к реализуемым в нефорсированных топках и газогенераторах плотного и кипящего слоев. Установлено, что древесный уголь, частицы которого имеют развитую структуру пор, воспламеняется при более низкой температуре, чем необработанная древесина. Это связано с тем, что частица необработанного биотоплива начинает гореть только после выхода летучих, который препятствует подводу кислорода к поверхности частицы.

В последние десятилетия в связи с возросшим вниманием к проблемам экологии возникает необходимость рассматривать новые многофазные горючие системы в качестве потенциального топлива энергетических установок. Таким топливом могут быть древесные опилки и щепа, использованные в качестве органических сорбентов для ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов. Существует также проблема утилизации отходов нефте- и мазутохранилищ [9], смывок цистерн [10] и т. п. Один из способов утилизации – их сжигание в смеси с твердым органическим топливом в топках с неподвижным слоем.

В настоящее время в литературе, посвященной слоевому горению, вопросы горения двухфазных топливных систем практически не освещены.

В [11] изучена возможность совместного сжигания древесной стружки и осадка сточных вод. Для этого проведены исследования сжигания смесей

различного состава в слоевой топке когенерационной установки. Показано, что сжигание можно осуществлять без предварительного высушивания топливной смеси или ее компонентов. Однако в связи с повышенным содержанием минеральных веществ и сложных химических соединений для сжигания такого смесового топлива могут потребоваться специальные системы золоудаления и очистки дымовых газов.

В [12] предложены два подхода, позволяющие адаптировать существующие расчетные модели тепло- и массопереноса в псевдооживленном слое к задаче расчета сжигания жидкого топлива в псевдооживленном слое инертного твердого материала. В первом подходе считается, что жидкость, поступающая в псевдооживленный слой, обволакивает твердые частицы. Затем в результате пиролиза и выхода летучих на поверхности частицы формируется углеродистый слой, который сгорает от внешней границы к поверхности частицы. Во втором подходе принимается, что жидкость претерпевает пиролиз до того, как встречает твердую частицу. В этом случае из каждой капли топлива образуется полая углеродистая частица, которая также сгорает от внешней границы.

Близкие по физико-математической постановке задачи возникают при рассмотрении проблемы внутрипластового горения нефти или термогазового метода интенсификации теплоотдачи. В [13] численно решена одномерная осесимметричная задача об иницировании волны горения в нефтенасыщенном пласте. Рассматривались два горючих компонента – подвижный (нефть) и неподвижный (кероген, нефтяной абсорбат). Проанализировано влияние наличия двух горючих компонентов на время иницирования горения и динамику фронта. Показано, что при сохранении полного теплосодержания системы увеличение доли подвижного компонента приводит к замедлению образования очага и снижению максимальной температуры в пласте, несмотря на более высокую реакционную способность жидкого компонента. Продемонстрировано, что скорости распространения фронта, по крайней мере после выхода на квазистационарный режим, близки для случаев с различной массовой долей жидкого компонента.

В статье рассматривается реактор с плотным пористым слоем, состоящим из твердофазного горючего компонента, пропитанного подвижным горючим компонентом. Исследуются два вида твердой фазы, отличающиеся характерным размером и соответствующими условиями гидродинамического взаимодействия с жидким компонентом, – древесные опилки и древесная щепа. Рассмотрены вопросы динамики воспламенения и динамики фронта горения, а также особенности, связанные с наличием подвижного (жидкого) топливного компонента. Решается задача о полноте выгорания топлива при поджигании слоя снизу и сверху.

Расчеты проведены с использованием стандартных процедур и кодов, ранее апробированных при решении комплекса задач внутрипластового горения [13]. Результаты проверены на адекватность теоретическим представлениям и имеющимся экспериментальным данным в предельном случае отсутствия жидкого компонента в системе. На основе расчетов даны рекомендации по сжиганию таких систем.

Постановка задачи и расчетная модель

Рассматривается горение плотного пористого слоя, состоящего из твердофазного горючего компонента (опилки, стружка, щепа), пропитанного подвижным горючим компонентом (нефть, мазут) (рис. 1). В нижнюю часть слоя подается воздушное дутье, осуществляется поджиг. По слою проходит волна фильтрационного горения, при этом часть подвижного компонента уносится с подаваемым дутьем и продуктами сгорания.

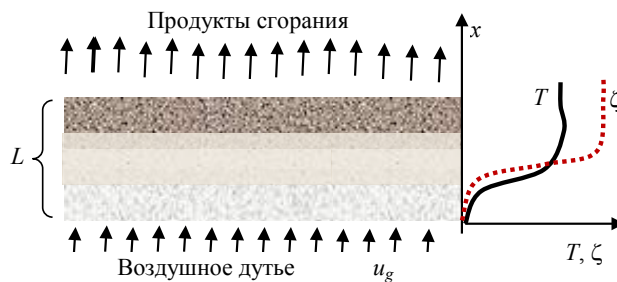


Рис. 1. Схема задачи о горении системы «горючая жидкость – твердое топливо»:

T – температура; ζ – доля жидкой фракции

Fig. 1. The diagram of the combustion problem of the system “combustible liquid – solid fuel”:

T – temperature; ζ – portion of liquid fraction

Основные уравнения, описывающие систему, приведены ниже.

Уравнения:

– неразрывности для газовой фазы

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_g)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\rho_g\vec{u}_g) = R_1 + R_2; \quad (1)$$

– движения газовой фазы (Дарси)

$$\vec{u}_g = -\frac{\kappa}{\varepsilon\mu_g} \nabla p. \quad (2)$$

Скорость движения жидкой фазы описывается аналогично

$$\vec{u}_l = -\frac{\kappa}{\varepsilon\mu_l} \nabla p. \quad (3)$$

Уравнения:

– баланса массы окислителя

$$\frac{\partial(\varepsilon\rho_g a)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon\rho_g a\vec{u}_g) = \nabla(\rho_g D\nabla a) - s_{a,1}R_1 - s_{a,2}R_2; \quad (4)$$

– баланса массы твердофазного горючего компонента

$$\frac{\partial b}{\partial t} = -R_1; \quad (5)$$

– баланса массы жидкого горючего компонента

$$\frac{\partial l}{\partial t} + \bar{u}_l \nabla l = \nabla (D_{dis} \nabla l) - R_2; \quad (6)$$

– теплового баланса

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + (\varepsilon \rho_g c_g \bar{u}_g + l c_l \bar{u}_l) \nabla T = \nabla (\lambda_{eff} \nabla T) + Q_1 R_1 + Q_2 R_2 - \beta (T - T_0), \quad (7)$$

где $\rho c = b c_b + l c_l + \varepsilon \rho_g c_g$; $\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon) \lambda_b + \varepsilon \lambda_g$.

Кинетика горения твердого и жидкого компонентов задается аррениусовскими формулами:

$$R_1 = W_1 a b \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right); \quad R_2 = W_2 a l \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right). \quad (8)$$

Моделирование горения системы «опилки – нефть»

Стандартные значения параметров, определяющих задачу, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Стандартные значения параметров задачи
The standard values of the parameters of the problem

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Высота реактора L , м	1	Температура окружающей среды T_0 , К	293
Пористость слоя ε	0,4	Коэффициент теплопотерь β , Вт/(м ³ ·К)	0,1
Диаметр частиц d_0 , м	0,0032	Расход воздушного дутья G , м ³ /(м ² ·с)	0,005
Проницаемость слоя κ	$\frac{\varepsilon^3 d_0^2}{180 \cdot (1 - \varepsilon)^2}$		
Параметры твердой фазы			
Начальное содержание b_0 , кг/м ³	450	Расход окислителя на единицу массы горючего при полном окислении $s_{a,1}$, кг/кг	3,3
Удельная теплоемкость c_b , Дж/(кг·К)	1700	Энергия активации реакции окисления E_1 , кДж/моль	73,5
Коэффициент теплопроводности λ_b , Вт/(м·К)	0,15	Предэкспонента скорости реакции окисления W_1 , с ⁻¹	80
Удельная теплота сгорания Q_1 , МДж/кг	13,8		

Окончание табл. 1

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Параметры жидкой фазы			
Начальное содержание l_0 , кг/м ³	50	Дисперсионный коэффициент диффузии D_{dis}	$0,1d_0\mu_l$
Вязкость μ_l , Па·с	$2 \cdot 10^{-3}$	Расход окислителя на единицу массы горючего при полном окислении $s_{a,2}$, кг/кг	3,3
Удельная теплоемкость c_l , Дж/(кг·К)	1900	Энергия активации реакции окисления E_2 , кДж/моль	50,4
Теплота сгорания Q_2 , МДж/кг	20	Предэкспонента скорости реакции окисления W_2 , с ⁻¹	15
Параметры газовой фазы			
Плотность ρ_g , для воздуха	$\rho_g(p, T)$	Коэффициент диффузии окислителя D , м ² /с	$9 \cdot 10^{-4}$
Удельная теплоемкость c_g , для воздуха	$c_g(T)$	Начальное содержание окислителя	0
Коэффициент теплопроводности λ_g , для воздуха	$\lambda_g(T)$	Массовая доля окислителя в дутье a_0	0,21
Вязкость μ_g , Па·с	$2 \cdot 10^{-5}$		

Представленная уравнениями (1)–(8) задача в нестационарной постановке моделировалась средствами пакета MathCad. Поджигание слоя осуществлялось за счет создания прогретой до температуры $T_{ини} = 600$ К зоны толщиной 2 см. Соответствующие температурные и концентрационные поля в динамике приведены на рис. 2–4.

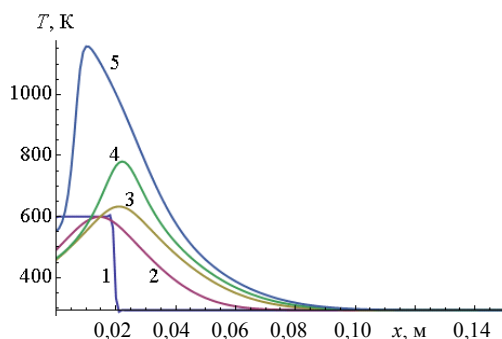


Рис. 2. Профиль температуры в нижней части реактора в динамике для времени, мин: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45 после поджига

Fig. 2. Temperature profile at the bottom of the reactor in dynamics for time, min: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45 after the ignition

Как видно из рис. 2, 3, высокотемпературный фронт окисления формируется за время порядка нескольких десятков минут, что обусловлено низкой начальной температурой поджига. При этом жидкофазный горючий компонент в силу своей подвижности эвакуируется из реактора до того, как фронт успевает сформироваться. Избежать такой ситуации можно, осуществляя поджиг в верхней части предварительно заполненного воздухом реактора и реализуя таким образом встречный режим распространения фронта горения.

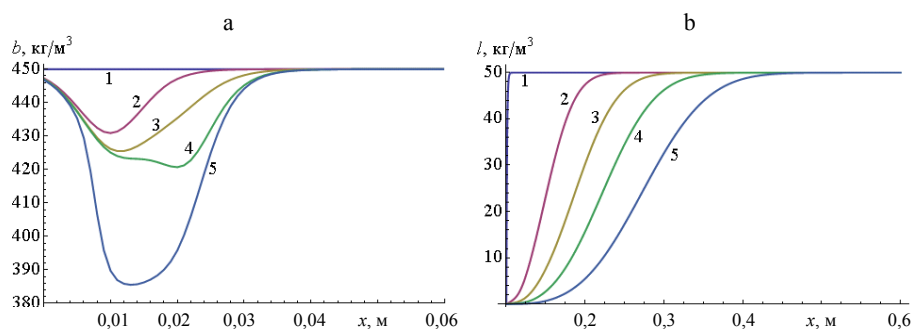


Рис. 3. Профиль содержания в нижней части реактора твердофазного (а) и жидкофазного (б) компонентов для времени, мин:

а: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45; б: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 45

Fig. 3. Profile of solid-phase content in the lower part of the reactor (а) and liquid-phase (б) components for time, min:

а: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45; б: 1 – 0; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 45

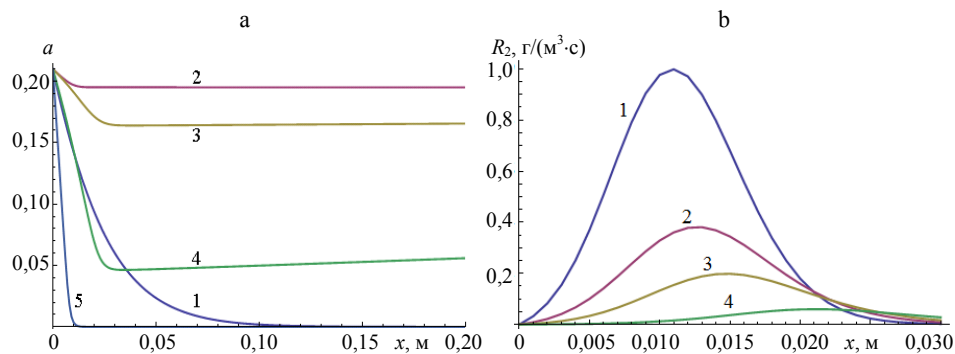


Рис. 4. Профиль массовой доли окислителя (а) и скорость окисления жидкофазного горючего компонента (б) в нижней части реактора для времени, мин:

а: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45; б: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 30

Fig. 4. Profile of the mass fraction of the oxidizer (а) and the oxidation rate of the liquid-phase fuel component (б) at the bottom of the reactor for time, min:

а: 1 – 0; 2 – 5; 3 – 35; 4 – 40; 5 – 45; б: 1 – 5; 2 – 10; 3 – 15; 4 – 30

Поджиг в верхней части слоя

Проведен расчет горения системы при поджиге в верхней части предварительно заполненного воздухом реактора. Результаты представлены на рис. 5–7.

Расчеты показывают, что при поджиге сверху подвижный горючий компонент движется через горячую зону и окисляется. При этом скорости реакции достигают намного более высоких значений, чем в случае поджига у нижнего края реактора (рис. 4), и реакция заканчивается только с истощением подвижного горючего компонента. Следует отметить, что, с технической точки зрения, осуществить поджиг сверху сложнее, чем снизу, ввиду того что теплота продуктов сгорания на начальной стадии не остается в системе в отличие от случая поджига снизу.

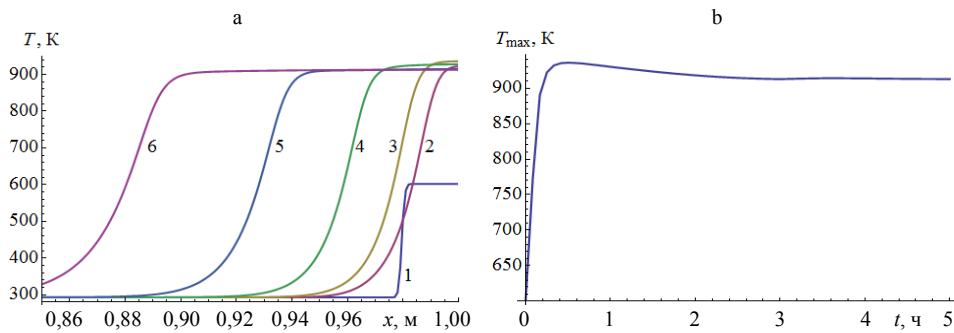


Рис. 5. Профиль температуры в верхней части реактора (а) и максимальной температуры в слое (б) для времени, мин: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 70; 5 – 145; 6 – 300 после поджига

Fig. 5. Temperature profile at the top of the reactor (a) and maximum temperature in layer (b) for time, min: 1 – 0; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 70; 5 – 145; 6 – 300 after the ignition

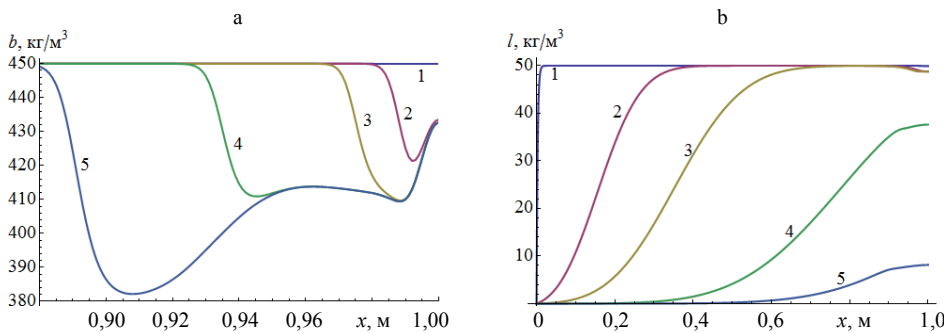


Рис. 6. Профиль содержания в верхней части реактора твердофазного горючего (а) и жидкофазного компонентов (б) для времени, мин:

a: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 150; 5 – 300; b: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 125; 5 – 200

Fig. 6. Solid-phase fuel component content profile at the top of the reactor (a) and liquid-phase component (b) for time, min:

a: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 150; 5 – 300; b: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 50; 4 – 125; 5 – 200

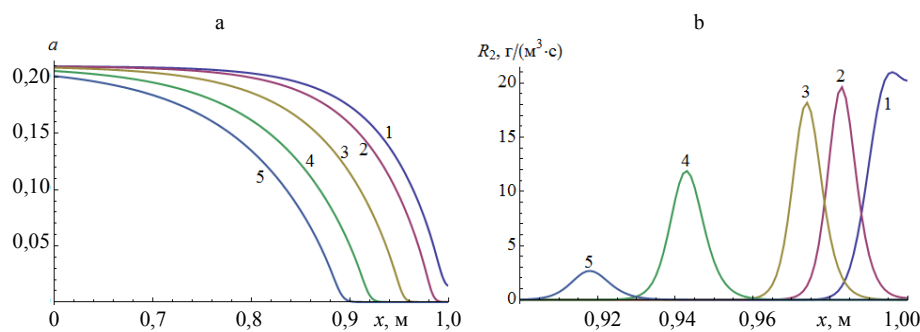


Рис. 7. Профиль массовой доли окислителя (а) и скорости окисления жидкофазного компонента (б) в верхней части реактора для времени, мин:

a: 1 – 5; 2 – 30; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; b: 1 – 5; 2 – 30; 3 – 50; 4 – 125; 5 – 200

Fig. 7. Profile of the mass fraction of the oxidizer (a) and the oxidation rate of the liquid-phase component (b) at the top of the reactor for time, min:

a: 1 – 5; 2 – 30; 3 – 100; 4 – 200; 5 – 300; b: 1 – 5; 2 – 30; 3 – 50; 4 – 125; 5 – 200

Заметим, что ввиду невысокой температуры инициирования горения процесс формирования высокотемпературного фронта в рассматриваемом случае затянута, как и при нижнем поджиге, а жидкая фаза в значительной доле эвакуируется из системы.

Моделирование горения системы «щепа – жидкое топливо»

Рассмотрим задачу слоевого сжигания системы «щепа – жидкое топливо». Предполагаем, что при выгорании материала системы, его испарении или отгонке жидкого компонента воздухом геометрия и пористая структура сохраняются (условие жесткости каркаса).

В рамках принятых предположений математическая модель тепло- и массообмена при горении аналогична модели (1)–(8). Отличие заключается в том, что при расчете системы «щепа – жидкое топливо» в модель в явном виде включен объем жидкой фазы, что позволяет учесть влияние насыщенности пористого материала горючей жидкостью и газовой фазой окислителем на относительную проницаемость каждой из фаз.

Доля объема пор, занятая газом, рассчитывается через объем жидкой фазы

$$s = 1 - \frac{l}{\varepsilon \rho_l}. \quad (9)$$

С учетом этого уравнения неразрывности для газовой фазы и уравнение баланса массы окислителя примут следующий вид:

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_g s \bar{u}_g) = R_1 + R_2; \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon \rho_g s a)}{\partial t} + \nabla(\varepsilon \rho_g s a \bar{u}_g) = \nabla(\rho_g D \nabla a) - s_{a,1} R_1 - s_{a,2} R_2. \quad (11)$$

Скорости движения газовой и жидкой фаз определяются законом Дарси с различной проницаемостью для разных фаз:

$$\bar{u}_g = -\frac{\kappa_g}{\varepsilon \mu_g} \nabla p; \quad \bar{u}_l = -\frac{\kappa_l}{\varepsilon \mu_l} \nabla p. \quad (12)$$

Проницаемости каждой из фаз выражались через проницаемость слоя с использованием относительных проницаемостей

$$\kappa_i = \kappa K_i.$$

Выражения для относительных проницаемостей фаз взяты согласно [14]:

$$K_g = \begin{cases} 0, & 0 \leq s \leq 0,1; \\ \left(\frac{s-0,1}{0,9}\right)^{3,5} (4-3s), & 0,1 \leq s \leq 1,0; \end{cases}$$

$$K_l = \begin{cases} \left(\frac{0,8-s}{0,8}\right)^{3,5}, & 0 \leq s \leq 0,8; \\ 0 & s \geq 0,8. \end{cases}$$

Уравнения баланса массы твердофазного (5) и жидкого (6) горючих компонентов, а также уравнение теплового баланса (7) сохраняют свой вид, однако с учетом объема, занятого жидкой фазой, эффективная теплопроводность рассчитывается по формуле

$$\lambda_{eff} = (1 - \varepsilon)\lambda_b + \varepsilon(1 - s)\lambda_l + \varepsilon s\lambda_g.$$

Скорости реакции определяются по (8).

При моделировании системы «щепа – жидкое топливо» значения параметров соответствовали данным табл. 1 за исключением параметров, представленных в табл. 2

Таблица 2

Расчетные параметры специфические для системы «щепа – жидкое топливо»

Design parameters specific to the "chip – liquid fuel" system

Параметр	Значение
Эффективный диаметр частиц d_0 , м	0,02
Перепад давления на слое Δp , Па	10
Параметр твердой фазы	
Удельная теплота сгорания Q_1 , МДж/кг	15
Параметры жидкой фазы	
Плотность ρ_l , кг/м ³	800
Коэффициент теплопроводности λ_l , Вт/(м·К)	0,15
Параметр газовой фазы	
Начальное содержание окислителя	0,21

Результаты соответствующих расчетов динамики профилей содержаний горючих компонентов, концентрации окислителя и температуры при стандартных значениях параметров при поджиге в нижней части реактора показаны на рис. 8, 9.

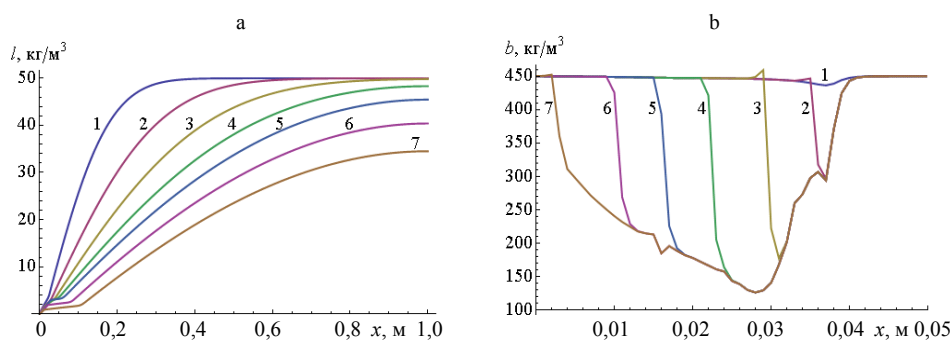


Рис. 8. Профиль содержания жидкого (а) и твердого (б) горючих компонентов в динамике для времени t , с: а: 1 – 10; 2 – 30; 3 – 60; 4 – 100; 5 – 150; 6 – 250; 7 – 400; б: 1 – 100; 2 – 110; 3 – 150; 4 – 250; 5 – 350; 6 – 450; 7 – 550

Fig. 8. Profile of the content of liquid (a) and solid (b) combustible components in dynamics for time t , s: a: 1 – 10; 2 – 30; 3 – 60; 4 – 100; 5 – 150; 6 – 250; 7 – 400; б: 1 – 100; 2 – 110; 3 – 150; 4 – 250; 5 – 350; 6 – 450; 7 – 550

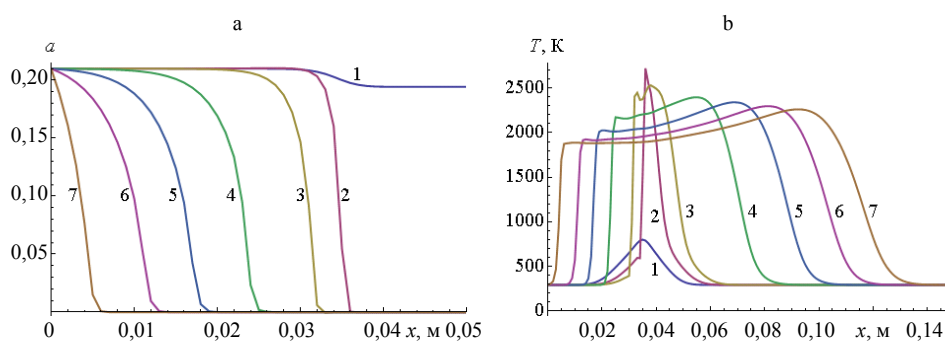


Рис. 9. Профиль концентрации газофазного окислителя (а) и температуры (б) в динамике для времени t , с: 1 – 90; 2 – 110; 3 – 130; 4 – 230; 5 – 330; 6 – 430; 7 – 530

Fig. 9. Concentration profile of gas-phase oxidizer (a) and temperature (b) in dynamics for time t , s: 1 – 90; 2 – 110; 3 – 130; 4 – 230; 5 – 330; 6 – 430; 7 – 530

При стандартных значениях параметров расчета жидкий горючий компонент быстро вытесняется из реактора (рис. 8), фронт вытеснения существенно опережает фронт прогрева (рис. 10). Поскольку точка первичного разогрева находилась на удалении 3,5 см от места подачи дутья в реактор, волна горения распространяется к входу в реактор, дожигая неокисленный твердый горючий компонент (рис. 8). При этом максимум тепловыделения смещается в направлении входа в реактор (рис. 10). Впоследствии волна горения переходит к спутному режиму распространения.

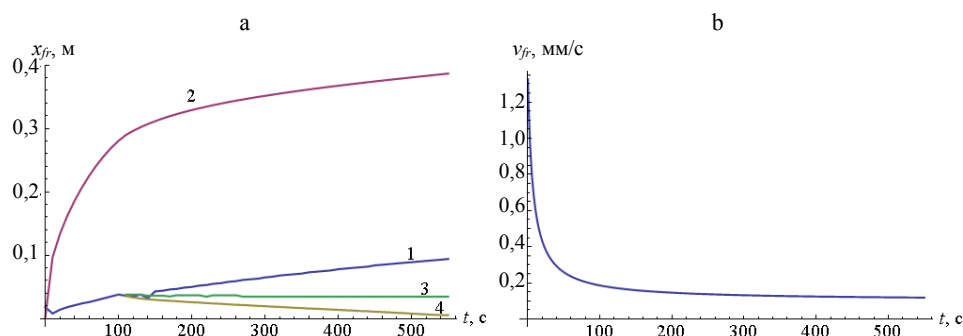


Рис. 10. Зависимость положения температурных и концентрационных фронтов (а) и скорости температурного фронта (б) от времени для координаты фронта по: 1 – максимуму температуры; 2 – среднему значению содержания жидкого горючего компонента; 3, 4 – то же твердого горючего компонента

Fig. 10. The dependence of the position of the temperature and concentration fronts (a) and the velocity of the temperature front (b) from time to time for the: 1 – maximum temperature; 2 – average content of the liquid fuel component; 3, 4 – same for the solid fuel component

Зависимости максимальной температуры в слое от времени, а также времени воспламенения (достижения пика температуры) от коэффициента объемных теплопотерь приведены на рис. 11. Как видно из рисунка, соот-

ветствующие графики имеют вид, характерный для теплового взрыва, что подтверждает адекватность расчета химической кинетики горения.

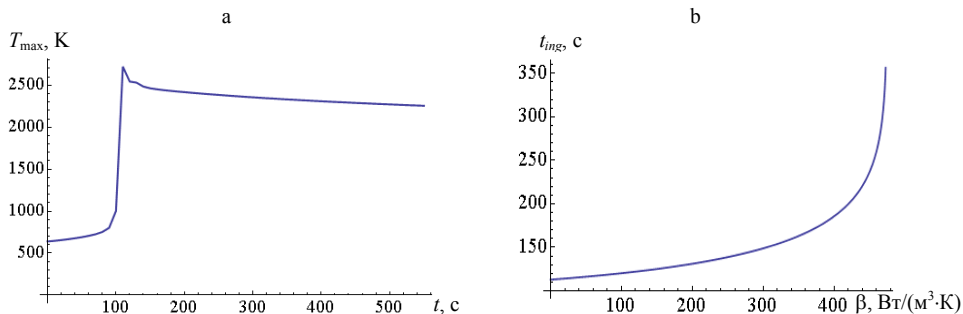


Рис. 11. Зависимость максимальной температуры в реакторе от времени (а) и времени воспламенения от коэффициента теплопотерь (б)

Fig. 11. Dependence of the maximum temperature in the reactor on the time (a) and dependence of the ignition time on the heat loss coefficient (b)

Поджиг в верхней части слоя

Динамика профиля содержаний горючих компонентов, концентрации окислителя и температуры при стандартных значениях параметров при поджиге в верхней части реактора показана на рис. 12–14.

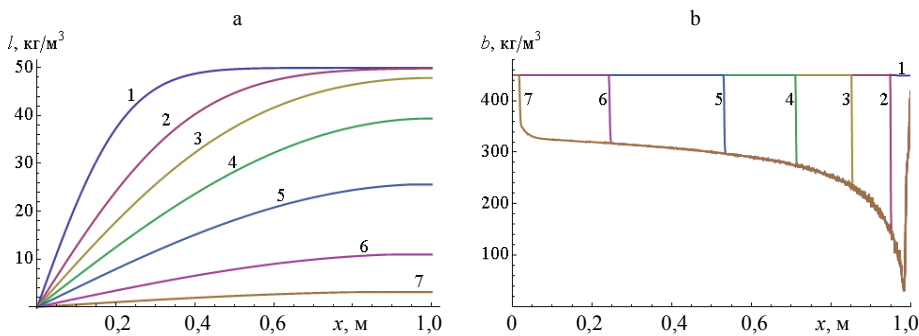


Рис. 12. Профиль содержания жидкого (а) и твердого (б) горючих компонентов по высоте реактора для времени t , с: а: 1 – 20; 2 – 60; 3 – 120; 4 – 300; 5 – 700; 6 – 1700; 7 – 3700; б: 1 – 20; 2 – 620; 3 – 2420; 4 – 6020; 5 – 12000; 6 – 24000; 7 – 34800

Fig. 12. Profile of the content of liquid (a) and solid (b) combustible components by reactor height for time t , s: а: 1 – 20; 2 – 60; 3 – 120; 4 – 300; 5 – 700; 6 – 1700; 7 – 3700; б: 1 – 20; 2 – 620; 3 – 2420; 4 – 6020; 5 – 12000; 6 – 24000; 7 – 34800

Динамика профиля содержания жидкого горючего компонента фактически не зависит от места поджига и определяется тем фактором, что при относительно большом размере частиц щепы за счет повышения проницаемости слоя увеличивается скорость фильтрации жидкого горючего компонента. В этих условиях вне зависимости от места поджига доля выгорающего жидкого горючего компонента незначительная (рис. 12).

Динамика профилей содержания твердого горючего компонента, концентрации окислителя и температуры (рис. 12, 13) показывает, что за время

порядка 100 с при стандартных значениях параметров формируется волна прогрева, распространяющаяся сверху вниз по реактору и сопровождающаяся частичным окислением твердого горючего компонента при полном расходе окислителя. По мере распространения этой волны температура на ее фронте падает (рис. 14), как и максимальная температура в реакторе, а также уменьшается степень выгорания твердого горючего.

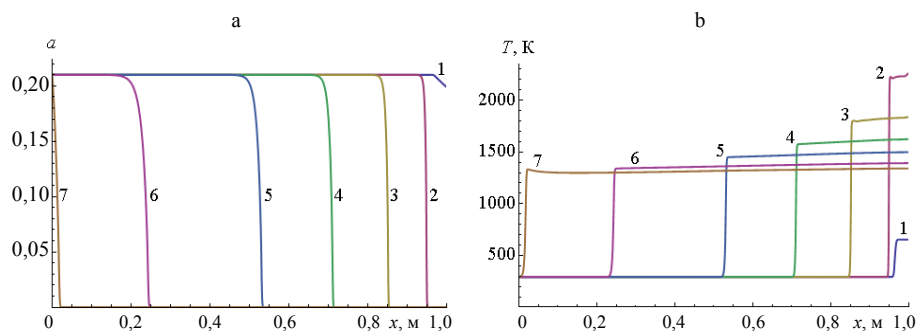


Рис. 13. Профиль концентрации газофазного окислителя (а) и температуры (б) по высоте реактора в динамике для времени t , с: 1 – 20; 2 – 620; 3 – 2420; 4 – 6020; 5 – 12000; 6 – 24000; 7 – 34800

Fig. 13. Concentration profile of gas-phase oxidizer (a) and temperature (b) reactor height in dynamics for time t , s: 1 – 20; 2 – 620; 3 – 2420; 4 – 6020; 5 – 12000; 6 – 24000; 7 – 34800

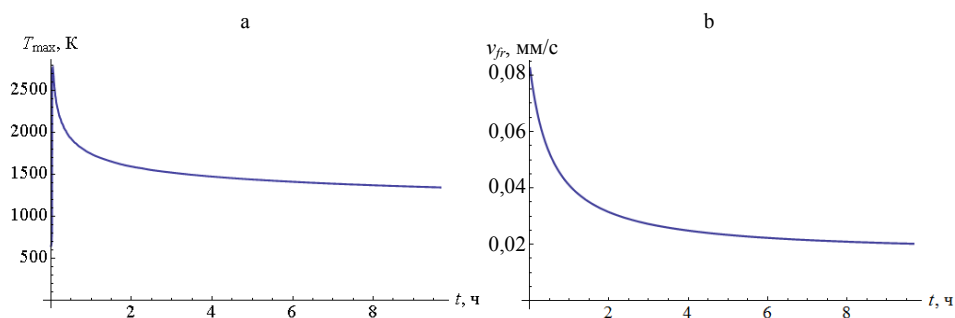


Рис. 14. Максимальная температура (а) и скорость (б) фронта в слое при поджиге сверху как функция времени

Fig. 14. Maximum temperature (a) and velocity (b) of the front in the layer when ignited from above as a function of time

Для определения положения фронта использовалось среднее между максимальным и минимальным значениями температуры в реакторе. Из рис. 14 видно, что зависимость скорости фронта прогрева от времени подобна таковой в случае поджига снизу на начальном этапе формирования фронта горения (рис. 10), однако характерная скорость фронта прогрева соответственно на порядок ниже. При этом время спада скорости фронта после первичного инициирования горения на один-два порядка больше. Быстрый спад скорости при поджиге снизу связан с тем, что жидкий горючий компонент эвакуируется из зоны горения за несколько секунд, а выгорание после первичного инициирования идет в обе стороны от

центра первичного очага (рис. 9). В случае поджига сверху жидкий компонент из нижних слоев доставляется во фронт горения в течение относительно длительного времени. Следует иметь в виду, что значение скорости как спутного, так и встречного распространения фронта непосредственно связано с выгоранием топлива и расходом воздушного дутья. При встречном распространении горения зависимость от расхода дутья может быть более сложной из-за неполного выгорания твердого компонента и вклада жидкого компонента топлива, транспортируемого вместе с дутьем. Однако после окончательного формирования фронтов горения их скорости близки как при спутном, так и при встречном распространении и определяются скоростью подачи окислителя.

ВЫВОДЫ

1. При горении системы с мелкодисперсной фазой (опилки), в силу низкой проницаемости для газов, расход воздушного дутья относительно невысок, что обуславливает медленное (порядка десятков минут) формирование температурного фронта. В случае крупнодисперсной твердой фазы (щепы) расходы воздуха существенно больше и соответствующее время формирования температурных фронтов составляет минуты.

2. Как для мелкодисперсной, так и крупнодисперсной твердых фаз при поджиге снизу жидкофазный горючий компонент в силу своей подвижности эвакуируется газовым потоком из горячей зоны раньше, чем формируется фронт горения. Поэтому основные закономерности динамики температурного фронта соответствуют «сухой» системе. При этом неизбежны выбросы из системы жидкого топливного компонента и продуктов его пиролиза, что обуславливает энергетические потери и негативные экологические последствия.

3. Избежать выбросов жидкого компонента можно, осуществляя поджиг в верхней части предварительно заполненного воздухом реактора и реализуя таким образом встречный режим распространения горения. Из теории фильтрационного горения известно [15], что встречный режим горения характеризуется более высокой устойчивостью и способностью компенсировать естественные неоднородности и возмущения фронта. Это свойство важно при практической реализации процесса.

4. При поджиге сверху за время порядка нескольких минут (при использованных значениях параметров) формируется волна прогрева, которая начинает распространяться сверху вниз по слою и сопровождается частичным окислением твердого горючего компонента при полном расходе окислителя. По мере распространения этой волны температура на ее фронте падает, как и максимальная температура в реакторе, а также уменьшается степень выгорания твердого горючего (рис. 12). В некоторых режимах степень выгорания твердого компонента со временем может носить немонотонный характер (рис. 6). Заметим, что эффект неполного выгорания известен, обсуждался в работах, посвященных фильтрационному горению [16] и горению угольных слоев [17], и завершается фазой окончательного выгорания топлива в спутной волне.

5. Скорость распространения фронта горения при поджиге сверху меньше таковой при поджиге снизу на время порядка десяти минут, что обусловлено характером формирования фронта после первичного инициирования (рис. 8, 9). На этапе квазистационарного распространения скорости спутной и встречной волн горения близки и определяются расходом окислителя. Различия связаны с эффектом неполного сгорания твердого компонента из-за пониженных температур и с гидродинамической транспортировкой жидкого компонента в зону горения при встречном режиме горения.

6. Экологически приемлемым способом сжигания двухфазных топливных систем с подвижным жидким компонентом является сжигание во встречной волне. Проведенные расчеты показывают техническую возможность такого процесса. Следует иметь в виду относительную сложность и энергетическую затратность инициирования горения сверху. При практической реализации топки для минимизации выбросов неокисленной органики целесообразны проведение энергичного поджига или организация непрерывного процесса горения с поперечной схемой подачи топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Делягин, Г. Н. Теплогенерирующие установки / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. М.: Стройиздат, 1986. 559 с.
2. Липов, Ю. М. Котельные установки и парогенераторы / Ю. М. Липов, Ю. М. Третьяков. М.: Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2003. 591 с.
3. Основы практической теории горения // под ред. В. В. Померанцева, 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. 311 с.
4. Хзмалян, Д. М. Теория топочных процессов / Д. М. Хзмалян. М.: Энергоатомиздат, 1990. 351 с.
5. Кнорре, Г. Ф. Топочные процессы. 2-е изд., перераб. и доп. / Г. Ф. Кнорре // М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 396 с.
6. Сеницын, Н. Н. Методика расчета прогрева плотного слоя топлива в топках для сжигания древесных отходов / Н. Н. Сеницын, Д. А. Домрачев, В. С. Грызлов // Вестник Череповецкого государственного университета. 2012. Т. 1, № 2. С. 26–28.
7. Каменецкий Б. Я. Закономерности выгорания твердого топлива в неподвижном слое / Б. Я. Каменецкий // Промышленная энергетика. 2013. № 5. С. 21–26.
8. Особенности воспламенения и горения биотоплив / А. Ф. Рыжков [и др.] // Инженерно-физический журнал. 2011. Т. 84, № 4. С. 820–829.
9. Черножуков, Н. И. Очистка нефтепродуктов и производство специальных продуктов. 3-е изд. доп. и испр. / Н. И. Черножуков. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1952. 336 с.
10. Зеленко, Ю. В. Принципы рационального ресурсопотребления при утилизации нефтесодержащих отходов на железнодорожном транспорте / Ю. В. Зеленко // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. 2009. Т. 19. С. 12–15.
11. Nils Skoglund Fuel Design in Co-Combustion of Demolition Wood Chips and Municipal Sewage Sludge / N. Skoglund [et al.] // Fuel Processing Technology. January 2016. Vol. 141, Part 2. P. 196–201.
12. Marcio, L. de Souza-Santos. Theoretical Models for Rates of Heterogeneous Reactions During Combustion and Gasification of Liquid Fuels in Fluidized Beds / L. de Souza-Santos Marcio // Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2018. Vol. 35, No 2. P. 679–690.
13. Козначеев, И. А. Одномерное моделирование фронта внутрипластового горения нефти с учетом подвижной и неподвижной горючих компонент / И. А. Козначеев, К. В. Добрего // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2019. Т. 62, № 1. С. 47–60. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>.
14. Басниев, К. С. Подземная гидромеханика / К. С. Басниев, И. Н. Кочина, В. М. Максимов. М.: Ин-т компьютерных исследований, 2006. 495 с.

15. Добрего, К. В. Физика фильтрационного горения газов / К. В. Добрего, С. А. Жданок // Минск: Ин-т тепло- и массообмена НАН Беларуси, 2002. 204 с.
16. Салганский, Е. А. Моделирование фильтрационного горения твердого пиролизующегося топлива / Е. А. Салганский, Е. В. Полианчик, Г. Б. Манелис // Физика горения и взрыва. 2013. Т. 49, № 1. С. 45–61.
17. Добрего, К. В. Режимы газификации бедных угольных слоев / К. В. Добрего, И. А. Козначеев // ИФЖ. 2006. Т. 79, № 2. С. 56–61.

Поступила 20.12.2018 Подписана в печать 26.02.2019 Опубликована онлайн 30.05.2019

REFERENCES

1. Delyagin G. N., Lebedev V. I., Permyakov B. A. (1986) *Heat Generating Plants*. Moscow, Stroiizdat Publ. 559 (in Russian).
2. Lipov Yu. M., Tret'yakov Yu. M. (2003) *Boiler Plants and Steam Generators*, Moscow – Izhevsk, Regul'yarnaya i Khaoticheskaya Dinamika Publ. 591 (in Russian).
3. Pomerantsev V. V., Aref'ev K. M., Akhmedov D. B., Rundyygin Yu. A., Korchunov Yu. N., Shagalova S. L., Shestakov S. M. (1986) *Fundamentals of the Practical Theory of Combustion*. 2nd ed. Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad Branch. 311 (in Russian).
4. Khzmalyan D. M. (1990) *Theory of Furnace Processes*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 351 (in Russian).
5. Knorre G. F. (1959) *Furnace Processes*. 2nd ed. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ. 396 (in Russian).
6. Sinitsyn N. N., Domrachev D. A., Gryzlov V. S. (2012) Method of Calculation of Heating of a Dense Layer of Fuel in Furnaces for Burning of Wood Waste. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Cherepovets State University Bulletin*, 1 (2), 26–28 (in Russian).
7. Kamenetskii B. Ya. (2013) Patterns of Solid Fuel Burning in a Fixed Bed. *Promyshlennaya Energetika = Industrial Power Engineering*, (5), 21–26 (in Russian).
8. Ryzhkov A. F., Silin V. E., Bogatova T. F., Nadir S. M. (2011) Ignition and Combustion Features of Biofuel. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 84 (4), 888–897 <https://doi.org/10.1007/s10891-011-0547-z>.
9. Chernozhukov N. I. (1952) *Purification of Petroleum Products and Production of Special Products*. 3rd ed. Moscow, Leningrad, Gostoptekhizdat Publ. 336 (in Russian).
10. Zelen'ko Yu. V. (2009) Principles of Rational Resource Consumption in the Utilization of Oily Waste in Railway Transport. *Sbornik Nauchnykh Trudov Donetskogo Instituta Zheleznodorozhnogo Transporta = Zbirnik naukovih prac' of Donetsk Railway Transport Institute*, (19), 12–15 (in Russian).
11. Skoglund N., Båfver L., Fahlström J., Holmén E., Renström C. (2016) Fuel Design in Co-Combustion of Demolition Wood Chips and Municipal Sewage Sludge. *Fuel Processing Technology*, 141, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.08.037>.
12. Marcio L. de Souza-Santos (2018) Theoretical Models for Rates of Heterogeneous Reactions During Combustion and Gasification of Liquid Fuels in Fluidized Beds. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35 (2), 679–690. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180352s20160495>.
13. Koznacheev I. A., Dobrego K. V. (2019) One-Dimensional Simulation of the In-Situ Oil Combustion with Consideration to Fluid and Solid Combustible Components. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obединenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (1), 47–60 (in Russian) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-1-47-60>.
14. Basniev K. S., Kochina I. N., Maksimov V. M. (2006) *Underground Hydromechanics*. Moscow, Institut Komp'yuternykh Issledovaniy Publ. 495 (in Russian).
15. Dobrego K. V., Zhdanok S. A. (2002) *Physics of Filtration Combustion of Gases*. Minsk, Institute of Heat and Mass Transfer of NAS of Belarus. 204 (in Russian).
16. Salganskii E. A., Polianchik E. V., Manelis G. B. (2013) Modeling Filtration Combustion of Pyrolyzing Solid Fuel. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 49 (1), 38–52. <https://doi.org/10.1134/s001050821301005x>.
17. Dobrego K. V., Koznacheev I. A. (2006) Regimes of Gasification of Lean Coal Layers. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 79 (2), 261–267. <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0095-0>.

Received: 20 December 2018 Accepted: 26 February 2019 Published online: 30 May 2019