

УДК 536.468

**Тепломассоперенос при газофазном зажигании  
слоя измельченного угля  
несколькими нагретыми до высоких температур  
металлическими частицами\***

**Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

E-mail: dmitriyog@tpu.ru

Численно исследованы характеристики газофазного зажигания слоя измельченного бурого угля марки 2Б Шивэ-Овооского месторождения Монголии при взаимодействии с одиночной и несколькими нагретыми до высоких (более 1000 К) температур металлическими частицами. Разработанная математическая модель процесса учитывает прогрев и термическое разложение угля за счет теплоты, подводимой от остывающих локальных источников, а также выход летучих компонентов, формирование и прогрев газовой смеси, ее воспламенение. Определены условия совместного влияния нескольких частиц на основную характеристику процесса — время задержки зажигания. Выявлена связь положения зоны инициирования горения в окрестности локальных источников энергии с интенсивностью прогрева горючей газовой смеси. Установлено, что при расстоянии между соседними частицами, превышающем в 1,5 и более раз характерный размер последних, анализ характеристик и закономерностей зажигания угля несколькими локальными источниками можно выполнять в рамках модели «одиночная металлическая частица–измельченный уголь–воздух». Также с использованием этой модели показано, что увеличение высоты горячей частицы наряду с уменьшением времен задержки ведет к снижению начальных температур источника, необходимых для зажигания твердого топлива. При неидеальном тепловом контакте на границе «металлическая частица–измельченный уголь», обусловленном естественной пористостью структуры последнего, снижается интенсивность процесса инициирования горения вследствие менее существенного влияния излучения в области пор на условия теплопередачи по сравнению с теплопереносом за счет кондукции в приповерхностном слое угля без учета его гетерогенной структуры.

**Ключевые слова:** измельченный уголь, горячая частица, теплоперенос, продукты термического разложения, диффузия, газофазное зажигание.

**Введение**

Исследование закономерностей тепломассопереноса в условиях локального нагрева измельченных (диспергированных) углей источниками ограниченной энергоемкости является актуальной задачей в связи с широким применением этих углей в качестве твердого топлива на тепловых электростанциях [1–3], а также в качестве сырья для производства синтетического жидкого топлива [4], газа [5], пористых углеродных [6] и строительных [7] материалов, сорбентов [8]. На разных этапах процесса подготовки (помол, перегрузка, транспортировка и другие) могут образовываться просыпи и отложения пыли, взаимодействие которых с источниками нагрева, например, разогретыми

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-6491.2016.8.

стенками технологического оборудования [9, 10] или горячими частицами [11] представляет высокую пожарную опасность. Как правило, на практике при зажигании диспергированного твердого топлива локальными источниками энергии в ходе какого-либо технологического процесса наиболее опасными с точки зрения возникновения возгораний и развития пожаров являются процессы взаимодействия сухого измельченного угля с горячими частицами. Локальные источники ограниченной энергоемкости могут возникать в результате проведения сварочных работ металлических изделий и их обработки методами абразивной резки или шлифования [12]. Также горячие частицы могут формироваться в результате коротких замыканий линий электропередач.

В условиях кондуктивного нагрева измельченного угля при взаимодействии с пластинами [9, 10] или локальными источниками [11] закономерности физико-химических процессов, протекающих в течение индукционного периода, могут существенно отличаться. Для практического приложения большой интерес представляют результаты изучения высокотемпературного инициирования горения измельченного угля несколькими нагретыми частицами. В условиях пространственно-временной неоднородности тепло-массопереноса в окрестности локального источника взаимодействие группы горячих частиц с диспергированным твердым топливом может оказывать влияние на условия и характеристики процесса инициирования горения, что преимущественно связано с динамикой формирования температурного поля в зоне реакции окисления горючих газов (являющихся продуктами термического разложения угля) кислородом воздуха.

Целью работы является численный анализ условий совместного влияния нескольких нагретых до высоких температур локальных источников энергии на характеристики газофазного зажигания слоя измельченного бурого угля.

### Постановка задачи

Согласно результатам [13, 14] было установлено, что при взаимодействии нескольких горячих частиц с конденсированным веществом условия зажигания определяются расстоянием между двумя соседними локальными источниками нагрева. При постановке задачи принимались во внимание вытекающие из этого факта теоретические следствия, изложенные в работах [13, 14], — возможность анализа влияния на условия и характеристики зажигания топлив несколькими нагретыми до высоких температур частицами при использовании модели, учитывающей только две частицы из любой сколь угодно большой совокупности локальных источников.

Исследование процесса инициирования горения проводилось в системах «одиночная металлическая частица–измельченный уголь–воздух» и «две металлические частицы–измельченный уголь–воздух» (рис. 1). Задача зажигания типичного бурого угля

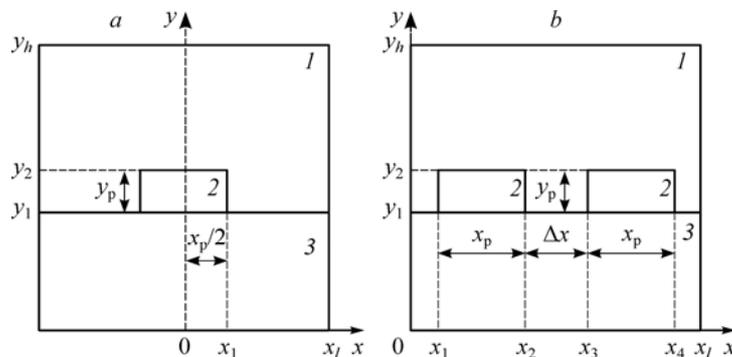


Рис. 1. Схема области решения задачи зажигания измельченного угля одной частицей (а) и несколькими частицами (б).

1 — воздух, 2 — горячая частица, 3 — измельченный уголь.

марки 2Б [15] разогретыми стальными частицами в форме параллелепипеда размерами  $x_p$  и  $y_p$  решалась в декартовой системе координат. В слое диспергированного твердого топлива и в воздухе по соответствующим координатам выделялись области размерами  $x_l$  и  $y_l$ , существенно большими, чем характерные размеры горячих частиц (рис. 1).

В настоящей работе принята следующая схема исследуемого процесса. В начальный момент времени металлические частицы с температурой  $T_p$ , существенно превышающей температуру окружающей среды  $T_0$ , находятся в условиях идеального теплового контакта с измельченным углем, размер частиц которого не превышает 0,1 мм. В результате прогрева до температур 500–600 К приповерхностного слоя угля за счет теплоты, аккумулированной горячими частицами, ускоряются процессы термического разложения и выхода летучих веществ. Газообразные продукты пиролиза твердого топлива из прогретой области фильтруются в направлении границы «измельченный уголь–воздух» ( $y = y_1$ ) и вдуваются в среду окислителя в малой окрестности основания локального источника энергии. В результате диффузии летучих веществ в воздухе формируется горючая газовая смесь. Ее прогрев до момента зажигания в основном происходит при движении вдоль боковых граней (рис. 1) локального источника. Химическое реагирование углеродистого остатка не рассматривалось, но на основании данных [16] можно отметить, что стадии зажигания и гетерогенного горения углерода предшествует интенсивный прогрев коксового остатка за счет энергии, поступающей из зоны реакции окисления летучих веществ в газовой среде.

Принимались следующие условия инициирования горения:

- теплота, выделяемая в результате реакции окисления летучих веществ, больше энергии, отводимой от горячей частицы в твердое топливо и газовую смесь;
- температура газовой смеси в зоне интенсивного развития реакции окисления превышает начальную температуру локального источника энергии.

При постановке задачи зажигания не рассматривался процесс испарения влаги, содержащейся в угле. Предполагалось взаимодействие сухого измельченного угля с горячими частицами. Инициирование горения влажного топлива при локальном нагреве источником ограниченной энергоемкости, скорее всего, невозможно. Теплоемкость частицы будет недостаточно для испарения воды и последующего зажигания диспергированного твердого натурального топлива. В таких условиях эффективная теплопроводность влажного угля достаточна высока. Интенсивный сток теплоты вглубь слоя топлива наряду с теплоотводом от металлической частицы и за счет испарения воды на границе контакта с углем ведет к существенному (сотни градусов) охлаждению источника нагрева. В результате индукционного процесса в прогретой области приповерхностного слоя измельченного угля влажность последнего снижается, но остатка энергии остывшей частицы уже недостаточно для зажигания. Происходит равномерный инертный прогрев твердого топлива в окрестности локального источника.

### Математическая модель и методы решения

В настоящем исследовании задача зажигания слоя измельченного угля разогретой до высоких температур частицей решена в плоской постановке. В работах [17, 18] было выполнено сравнение результатов моделирования в рамках сформулированных одномерных, двумерных и пространственных постановок задач тепломассопереноса при зажигании конденсированных веществ локальными источниками энергии. В результате проведенного численного анализа было установлено, что в достаточно широком диапазоне варьирования теплоемкости источника нагрева (при изменении начальной температуры, размеров, формы) отклонения основных характеристик процессов зажигания (времен задержки, предельных температур) для одномерных и плоских постановок задач составляют до 30 % (в этом случае не учитывается дополнительный прогрев горючей

газовой смеси за счет теплообмена с боковыми гранями горячей частицы). Для пространственных и двумерных постановок отклонения времен задержки менее существенны и не превышают 10 %.

Также в работе [19] при анализе результатов математического моделирования остывания стального цилиндра, полученных в рамках плоских и пространственных постановок, и их сопоставлении с соответствующими экспериментальными данными была установлена удовлетворительная корреляция основной характеристики процесса — температуры металлического цилиндра. Отклонение соответствующих теоретических значений, вычисленных в рамках математической модели для пространственной постановки задачи, а также результатов прогностического моделирования в плоской постановке относительно экспериментальных данных не превышает 1–3 %.

В отличие от случая одиночного локального источника энергии при зажигании слоя измельченного угля несколькими нагретыми до высоких температур металлическими частицами допущение о возможности плоской постановки задачи будет оказывать еще меньшее влияние на достоверность определения характеристик зажигания по сравнению с пространственной моделью процесса. По аналогии с результатами, установленными в рамках плоской модели зажигания, отток теплоты от локальных источников по третьей координате (второй поперечной) будет несущественно (менее 10 %) влиять на условия и характеристики процесса зажигания.

Математическая модель, описывающая взаимосвязанные процессы теплопереноса и термического разложения в диспергированном твердом топливе, а также тепломассопереноса и окисления в газовой смеси, представляет собой систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. Уравнения имеют следующий вид:

– уравнение энергии для смеси летучих веществ с воздухом:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} \right) + Q_1 W_1; \quad (1)$$

– уравнение диффузии летучих веществ в воздухе:

$$\frac{\partial \mu_v}{\partial t} = D_1 \left( \frac{\partial^2 \mu_v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mu_v}{\partial y^2} \right) - \frac{W_1}{\rho_1}; \quad (2)$$

– уравнение баланса концентрации компонентов газовой смеси:

$$\mu_v + \mu_o = 1; \quad (3)$$

– уравнение энергии для горячей частицы:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

– уравнение энергии для угля:

$$\rho_3 C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} \right) - Q_3 W_3; \quad (5)$$

– уравнение химической кинетики для угля:

$$\frac{\partial \eta_3}{\partial t} = (1 - \eta_3) k_3 \exp \left( - \frac{E_3}{RT_3} \right). \quad (6)$$

Массовая скорость окисления летучих веществ [20] вычисляется следующим образом:

$$W_1 = \rho_1 \mu_v \mu_0 k_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right); \quad (7)$$

массовая скорость термического разложения угля [20] имеет вид:

$$W_3 = \rho_3 \frac{\partial \eta_3}{\partial t}. \quad (8)$$

Коэффициент диффузии газообразных продуктов термического разложения угля в воздухе  $D_1 = D_0(T_1/73)^{1,7}$ .

Связь степени термического разложения угля с концентрацией летучих компонентов в его составе описывается аналогично [21] выражением

$$\eta_3 = 1 - \mu_v / (1 - \mu_c).$$

Теплофизические свойства газовой смеси вычислялись с учетом объемных концентраций компонентов:

$$\rho_1 = \rho_v \phi_v + \rho_o \phi_o, \quad C_1 = C_v \phi_v + C_o \phi_o, \quad \lambda_1 = \lambda_v \phi_v + \lambda_o \phi_o,$$

$$\phi_v = \frac{\mu_v / \rho_v}{\mu_v / \rho_v + \mu_o / \rho_o}, \quad \phi_v + \phi_o = 1.$$

Плотность угля, изменяющаяся в результате термического разложения и выхода летучих веществ, вычислялась с использованием выражения  $\rho_3 = \rho_c \varphi_c + \rho_v \varphi_v$ ; теплоемкость и теплопроводность топлива задавались в виде функций от температуры [22, 23]:

$$C_3 = -0,18 \cdot 10^{-3} T_3^2 - 0,197 T_3 + 1515, \text{ при } 300 < T_3 < 1500 \text{ К,}$$

$$\lambda_3 = 0,075 \cdot 10^{-6} T_3^2 + 0,014 \cdot 10^{-3} T_3 + 0,138, \text{ при } 300 < T_3 < 1500 \text{ К.}$$

Приняты обозначения:  $C$  — теплоемкость, Дж/(кг·К);  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $E$  — энергия активации, Дж/моль;  $k$  — предэкспоненциальный множитель, 1/с;  $Q_1$ ,  $W_1$  — тепловой эффект (Дж/кг) и массовая скорость (кг/(м<sup>3</sup>·с)) реакции окисления летучих веществ;  $Q_3$ ,  $W_3$  — тепловой эффект (Дж/кг) и массовая скорость (кг/(м<sup>3</sup>·с)) термического разложения угля,  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  — температура, К;  $T_0$  — начальная температура воздуха и угля, К;  $T_p$  — начальная температура горячей частицы, К;  $t$  — время, с;  $t_d$  — время задержки зажигания, с;  $x$ ,  $y$  — координаты, м;  $x_h$ ,  $y_h$  — размеры области решения, м;  $x_p$ ,  $y_p$  — размеры горячей частицы, м;  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  — шаги по пространственным координатам, м;  $\Delta t$  — шаг по времени, с;  $\eta$  — степень термического разложения угля;  $\lambda$  — теплопроводность, Вт/(м·К),  $\mu$  — массовая концентрация,  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\varphi$  — объемная концентрация; индексы: 1 — газовая смесь летучих веществ с воздухом, 2 — горячая стальная частица, 3 — уголь, с — углерод, о — воздух, v — летучие вещества.

Начальные условия ( $t = 0$ ) имеют вид:

- температура воздуха и измельченного угля  $T_1 = T_3 = T_0$ ;
- температура локального источника нагрева  $T_2 = T_p$ ;
- массовая концентрация компонентов (углерод и летучие вещества) угля  $\mu_c + \mu_v = 1$ ,  $\mu_o = 0,6$ ;
- степень термического разложения угля  $\eta_3 = 0$ ;
- массовая концентрация летучих веществ в газовой среде  $\mu_v = 0$ .

Граничные условия (рис. 1а) при  $0 < t < t_d$  (для области решения, представленной на рис. 1б, граничные условия аналогичны):

$$\begin{aligned}
 & x = 0, \quad 0 < y < y_1; \\
 & x = x_b, \quad 0 < y < y_1, \quad \partial T_3 / \partial x = 0; \\
 & x = 0, \quad y_1 < y < y_2, \quad \partial T_2 / \partial x = 0; \\
 & x = 0, \quad y_2 < y < y_b; \\
 & x = x_b, \quad y_1 < y < y_b, \quad \partial T_1 / \partial x = 0, \quad \partial \mu_v / \partial x = 0; \\
 & x = x_1, \quad y_1 < y < y_2, \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} - q_p, \quad T_2 = T_1, \quad \frac{\partial \mu_v}{\partial x} = 0; \\
 & y = 0, \quad 0 < x < x_b, \quad \partial T_3 / \partial y = 0; \\
 & y = y_1, \quad 0 < x < x_1, \quad -\gamma \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} - (1 - \gamma) q_p = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y}, \quad T_3 = T_2; \\
 & y = y_1, \quad x_1 < x < x_1 + 0,5 \cdot 10^{-3}, \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} + Q_3 \int_{y=0}^{y=y_1} W_3 dy = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad T_3 = T_1; \\
 & \quad -\rho_1 D_1 \frac{\partial \mu_v}{\partial y} = f(x) \int_{y=0}^{y=y_1} \int_{x=0}^{x=x_1} W_3 dx dy + \int_{y=0}^{y=y_1} W_3 dy; \\
 & y = y_1, \quad x_1 + 0,5 \cdot 10^{-3} < x < x_b, \quad -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} + Q_3 \int_{y=0}^{y=y_1} W_3 dy = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y}, \quad T_3 = T_1; \\
 & \quad -\rho_1 D_1 \frac{\partial \mu_v}{\partial y} = \int_{y=0}^{y=y_1} W_3 dy; \\
 & y = y_2, \quad 0 < x < x_1, \quad -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} = -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} - q_p, \quad T_2 = T_1, \quad \frac{\partial \mu_v}{\partial y} = 0; \\
 & y = y_b, \quad 0 < x < x_b, \quad \partial T_1 / \partial y = 0, \quad \partial \mu_v / \partial y = 0,
 \end{aligned}$$

здесь  $\gamma$  — безразмерный параметр, учитывающий пористость приповерхностного слоя диспергированного твердого топлива ( $0 < \gamma < 1$ ). При  $\gamma \rightarrow 1$  условия теплового контакта на границе «металлическая частица — измельченный уголь» ( $y = y_1, 0 < x < x_1$ ) близки к идеальным. Плотность лучистого теплового потока от источника энергии вычислялась по формуле  $q_p = \sigma \varepsilon T_2^4$ , где  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\varepsilon$  — степень черноты.

Аналогично математическим моделям процессов зажигания конденсированных веществ локальными источниками нагрева [24, 25] принята следующая функция распределения газообразных продуктов термического разложения угля в окрестности основания горячей частицы на границе «измельченный уголь–воздух» ( $y = y_1$ ):  $f(x) = 0,0227/x$ ,

$$\text{где } x_1 < x < x_1 + 0,5 \cdot 10^{-3}, \quad \int_{x=x_1}^{x=x_1+0,5 \cdot 10^{-3}} f(x-x_1) dx = 1.$$

Выход летучих продуктов термического разложения твердого натурального топлива через его пористую структуру в среду окислителя реализуется на десяти шагах разностной сетки в направлении оси  $x$ . С увеличением номера шага в диапазоне  $x_1 < x < x_1 + 0,5 \cdot 10^{-3}$  концентрация вдуваемых в воздух газов уменьшается. Стоит отметить, что суммарное

значение этой величины соответствует концентрации летучих веществ, выделяющихся в результате термического разложения угля под горячей стальной частицей и в ее малой окрестности.

При постановке задачи принято допущение о доминировании теплопроводности в слое измельченного угля. В такой гетерогенной структуре в зависимости от степени ее уплотнения возможны различные уровни пористости, соответственно при высокой доле пор теплоперенос в приповерхностном слое угля может осуществляться кроме кондукции еще и за счет излучения и конвекции. Два последних механизма теплопереноса в рассматриваемых условиях малозначительны. Температуры приповерхностного слоя угля относительно невелики — не превышают 500–700 К в течение всего периода индукции. Поэтому вклад в теплоперенос лучистой составляющей по сравнению с кондуктивной менее значителен. Конвекция же не оказывает существенного влияния на интенсивность теплопередачи в прогретом слое угля из-за малых толщин этого слоя и небольшой длительности индукционного периода. За время, предшествующее зажиганию, уголь прогревается на глубину не более нескольких сотен микрометров.

При разработке алгоритма численного решения системы уравнений (1)–(8) с соответствующими начальными и граничными условиями использовались методы конечных разностей и локально-одномерный, методы итераций и прогонки (по неявной четырехточечной разностной схеме). Принимались следующие параметры разностной и временной сеток: шаги по пространственным координатам  $\Delta x = \Delta y = 50$  мкм, шаг по времени  $\Delta t = 10$  мкс. Установлено, что уменьшение шагов  $\Delta x$  и  $\Delta y$  от 100 до 50 мкм и  $\Delta t$  от 20 до 10 мкс ведет к изменению результатов математического моделирования не более чем на 0,5 %. При этом погрешность выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи не превышает 1,2 %.

### Результаты и их обсуждение

Численное моделирование процессов теплопереноса в течение индукционного периода выполнено при начальных температурах воздуха и угля  $T_0 = 300$  К, температуры горячей стальной частицы  $T_p = 1000$ –1500 К. Размеры области решения составляли  $x_l = y_h = 20$  мм (рис. 1), размеры металлической частицы —  $x_p = 6$  мм,  $y_p = 3$ –6 мм. Степень черноты частицы  $\varepsilon = 0,55$ .

В качестве твердого топлива выбран типичный бурый уголь марки 2Б Шивэ-Овооского месторождения Монголии, незначительно отличающийся по свойствам от широко распространенных энергетических углей [15] марок 2Б и 3Б Канско-Ачинского бассейна (Березовское и Ирша-Бородинское месторождения), Азейского месторождения Иркутского бассейна, а также Баганурского месторождения Монголии. Характеристики и компонентный состав бурого угля марок 2Б и 3Б изменяются в достаточно узких диапазонах [15]: влажность  $25 < W^a < 40$  %, зольность сухой массы  $5,7 < A^d < 12,5$  %, выход летучих веществ  $40,3 < V^{daf} < 53,7$  %, теплота сгорания низшей рабочей массы  $14,6 < Q_s^r < 15,99$  МДж/кг, содержание углерода  $71,2 < C^{daf} < 74,2$  %, водорода  $4,6 < H^{daf} < 5,5$  %, азота  $0,88 < N^{daf} < 1,3$  %, серы  $0,26 < S^{daf} < 1,18$  %, кислорода  $19 < O^{daf} < 22,28$  %. Основные характеристики твердого натурального топлива Шивэ-Овооского месторождения в исходном состоянии приведены в таблице [15].

Таблица  
Характеристики бурого угля марки 2Б Шивэ-Овооского месторождения Монголии [15]

Технический анализ				Элементный состав				
$W^a$ , %	$A^d$ , %	$V^{daf}$ , %	$Q_s^r$ , МДж/кг	$C^{daf}$ , %	$H^{daf}$ , %	$N^{daf}$ , %	$S^{daf}$ , %	$O^{daf}$ , %
28	12,3	51,54	14,82	73,27	4,63	0,88	0,93	20,3

По данным работ [22, 23, 26–28] приняты следующие теплофизические свойства веществ и эффективные кинетические характеристики процессов термического разложения и окисления:

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= 0,026 \text{ Вт/(м·К)}, \rho_0 = 1,161 \text{ кг/м}^3, C_0 = 1190 \text{ Дж/(кг·К)}; \\ \lambda_2 &= 49 \text{ Вт/(м·К)}, \rho_2 = 7831 \text{ кг/м}^3, C_2 = 470 \text{ Дж/(кг·К)}; \\ \lambda_c &= 0,149 \text{ Вт/(м·К)}, \rho_c = 1200 \text{ кг/м}^3, C_c = 1440 \text{ Дж/(кг·К)} \text{ при } T_3 = 300 \text{ К}; \\ \lambda_v &= 0,03 \text{ Вт/(м·К)}, \rho_v = 0,5 \text{ кг/м}^3, C_v = 1132 \text{ Дж/(кг·К)}, D_0 = 0,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}; \\ E_1 &= 77 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}, Q_1 k_1 = 5,52 \cdot 10^{11} \text{ Дж/(кг·с)}; \\ E_3 &= 195 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль}, Q_3 k_3 = 25,5 \cdot 10^{14} \text{ Дж/(кг·с)}. \end{aligned}$$

Задача анализа исследуемого процесса (рис. 1b) состояла в установлении условий совместного влияния нескольких локальных источников энергии на основную характеристику процесса — время задержки зажигания  $t_d$  измельченного угля. Для одиночных частиц было установлено [29], что основным фактором, определяющим  $t_d$ , является теплосодержание источника нагрева  $Q_2^0 = \rho_2 C_2 V_2 (T_p - T_0)$  [30], которое в большей степени характеризуется его начальной температурой  $T_p$ . Для условий взаимодействия измельченного угля с группой частиц также целесообразно провести анализ влияния расстояния между источниками  $\Delta x$  (рис. 1b) на величину  $t_d$ . Поэтому численные исследования выполнены при варьировании начальной температуры локальных источников нагрева в диапазоне  $1000 < T_p < 1500 \text{ К}$ , а также при изменении значения параметра  $L = \Delta x/x_p$  (рис. 1b), характеризующего расстояние между двумя соседними частицами в диапазоне  $0,5 < L < 1$ .

На рис. 2 представлены зависимости времен задержки зажигания измельченного угля от начальной температуры источников энергии при инициировании процесса горения твердого топлива одиночной (кривая 1) и несколькими (кривые 2, 3) горячими частицами, расположенными на расстояниях  $L = 0,5$  и  $L = 1$  друг от друга. В условиях, когда  $L > 1,5$ , времена задержки соответствуют аналогичным значениям, установленным при зажигании слоя измельченного угля одиночной частицей (рис. 1a). В случае  $L < 0,5$  отклонение  $t_d$  относительно значений, описываемых кривой 3, не превышает 7%. Таким образом, область, ограниченная кривыми 1 и 3 на рис. 2, соответствует условиям и характеристикам зажигания слоя измельченного угля несколькими частицами в достаточно широких диапазонах варьирования начальных температур локальных источников ( $T_p = 1050\text{--}1500 \text{ К}$ ) и расстояния между ними ( $L = 0,1\text{--}1,5$ ).

Уменьшение параметра  $L$  ведет к снижению не только длительности индукционного периода, но и предельных (минимальных) начальных температур частиц, необходимых для зажигания твердого топлива. Максимальное отличие времен задержки зажигания в системе (рис. 1b) при изменении расстояния между источниками достигает 48%, при этом уменьшение предельного для зажигания значения  $T_p$  составляет 70–80 К. При увеличении начальной температуры источников энергии ( $T_p > 1250 \text{ К}$ ) совместное влияние частиц на  $t_d$  уменьшается (рис. 2).

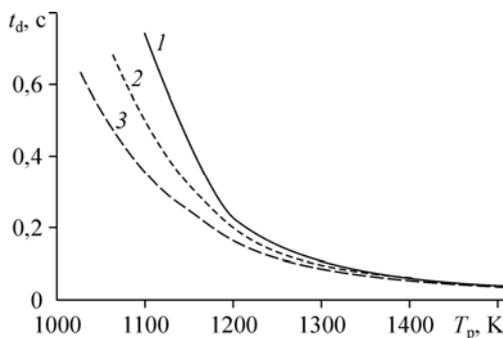


Рис. 2. Зависимости времен задержки зажигания измельченного угля от начальной температуры источника. 1 — одна частица, 2 — две частицы при  $L = 1$ , 3 — две частицы при  $L = 0,5$ .

Это можно объяснить тем, что с повышением  $T_p$  возрастает теплосодержание металлических частиц и уменьшается влияние соседних источников на процессы прогрева приповерхностного слоя угля и газовой смеси. В этом случае растет температура продуктов термического разложения твердого топлива, требуется меньше время на прогрев смеси горючих газов с окислителем. Локальные зоны воспламенения, как и для случая одиночной частицы, формируются около боковых граней источников в окрестности границы контакта с измельченным углем ( $y = y_1$ ).

На рис. 3 и 4 показаны поля температур и концентраций летучих веществ в области решения задачи в момент воспламенения газовой смеси. Для системы «одиночная металлическая частица–измельченный уголь–воздух» (рис. 1а) характерны три режима зажигания,

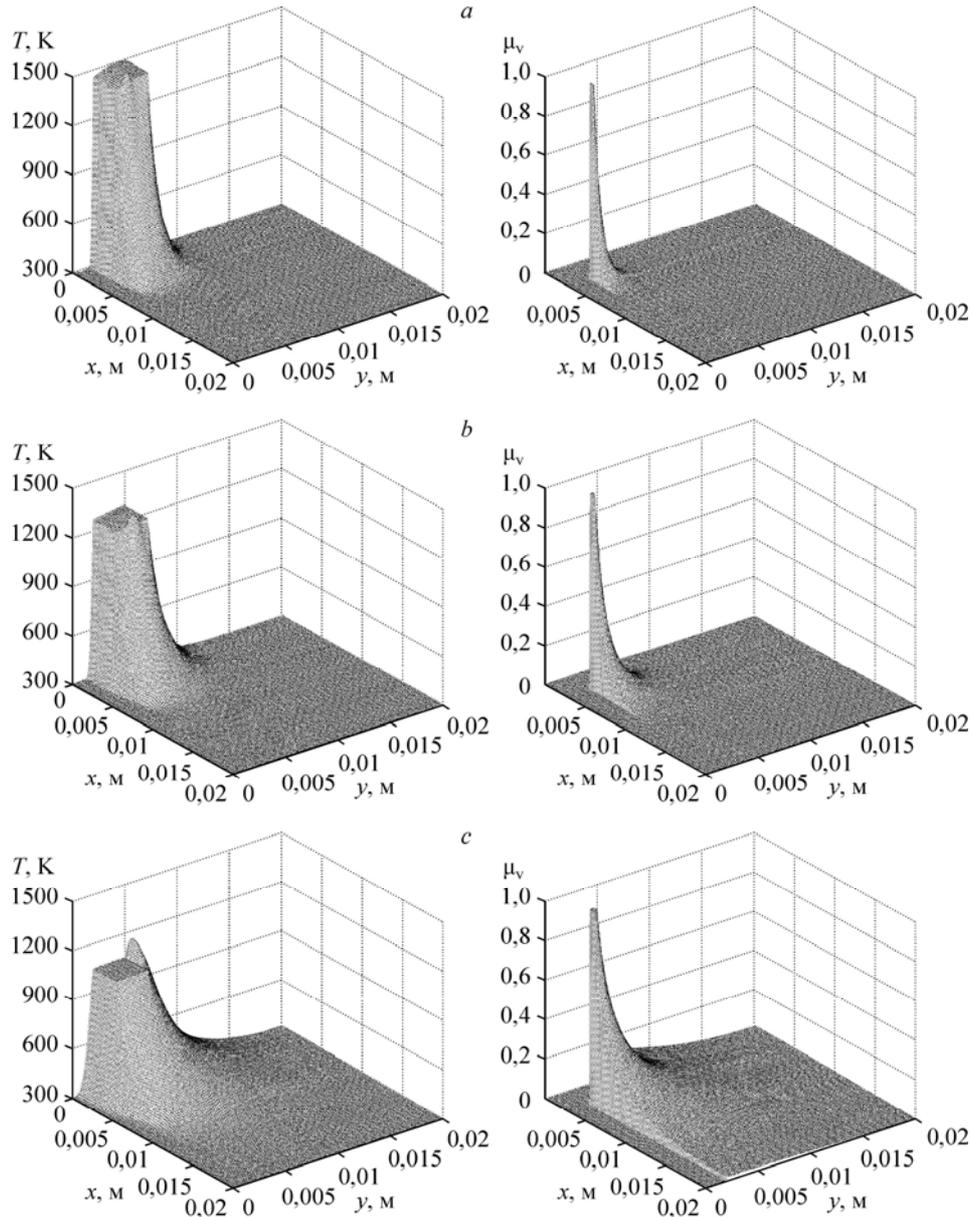


Рис. 3. Поля температур ( $T$ , К) и концентраций ( $\mu_v$ ) летучих веществ в момент зажигания измельченного угля одиночной частицей.

$a$  —  $t_d = 0,041$  с при  $T_p = 1500$  К,  $b$  —  $t_d = 0,137$  с при  $T_p = 1300$  К,  $c$  —  $t_d = 0,733$  с при  $T_p = 1100$  К.

отличающиеся расположением зоны интенсивного развития реакции окисления. При  $T_p > 1350$  К,  $t_d < 0,1$  с (первый режим) зона зажигания (рис. 3а) расположена у основания горячей частицы ( $x \rightarrow x_1, y \rightarrow y_1$ ). В условиях второго режима при  $1200 < T_p < 1350$  К,  $0,1 < t_d < 0,5$  с зона инициирования горения (рис. 3б) находится около боковой грани локального источника ( $x \rightarrow x_1, y_1 < y < y_2$ ). При  $T_p < 1200$  К,  $t_d > 0,5$  с (третий режим) зона зажигания (рис. 3с) расположена над горячей частицей ( $x \rightarrow 0, y > y_2$ ).

В системе «две металлические частицы–измельченный уголь–воздух» (рис. 1б) при изменении  $T_p = 1050–1500$  К и  $L = 0,1–1,5$  реализуются только два режима зажигания. Определяющее влияние на расположение зоны локализации ведущей химической реакции окисления в газовой среде в окрестности источников нагрева оказывает параметр  $L$ . Установлено (рис. 4а), что при значениях  $L \leq 0,5$  формируется одна локальная зона воспламенения. Она располагается на оси симметрии ( $x = x_1/2$ ) области решения задачи (рис. 1б), где в результате совместного влияния источников энергии максимальны не только градиенты температур, но и концентрации газообразных продуктов термического разложения угля. При увеличении  $L$  и прочих равных условиях (рис. 4б) формируется два очага зажигания. Каждый из них располагается в малой окрестности ближнего для него источника нагрева. При  $L > 0,5$  концентрация летучих веществ в окрестностях боковых граней источников ( $x = x_1, x = x_2, x = x_3, x = x_4, y_1 < y < y_2$ ) одинакова. Однако область максимальных градиентов температур формируется между горячими частицами ( $x_2 < x < x_3, y_1 < y < y_2$ ), где выполняются условия зажигания.

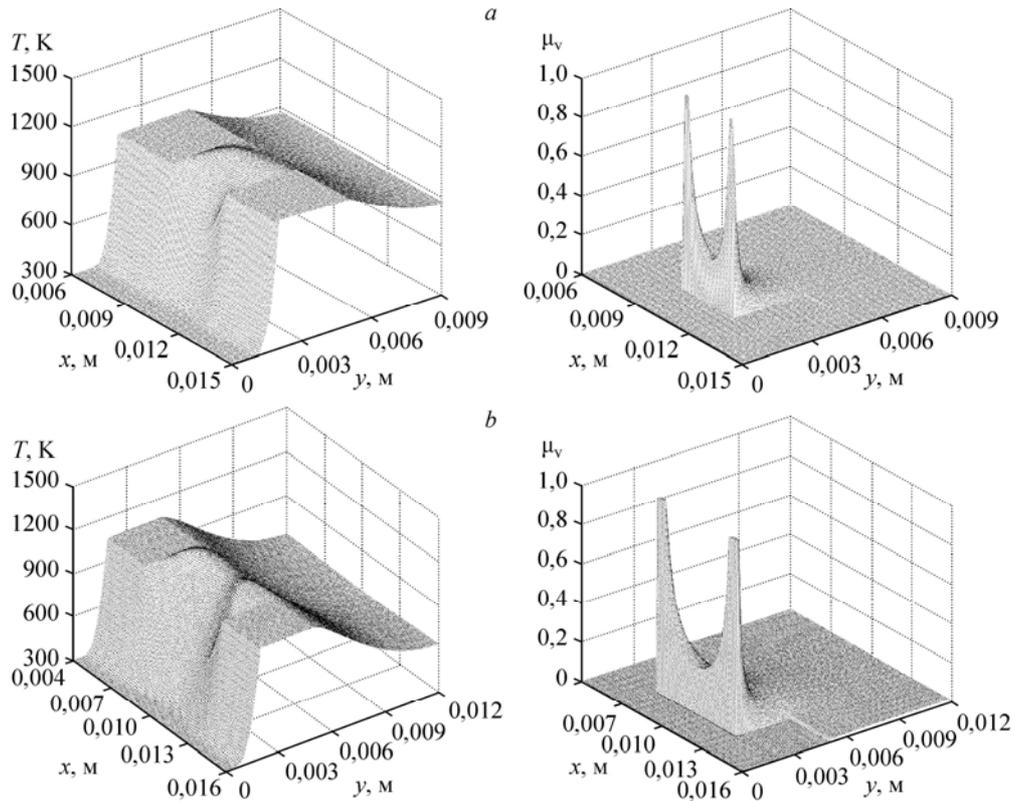
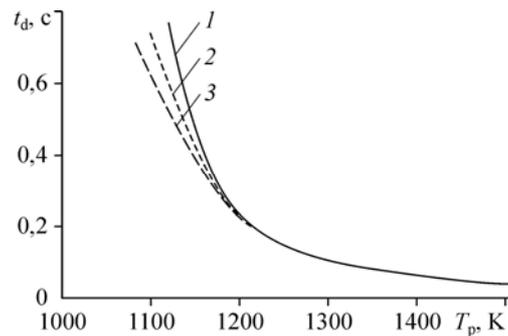


Рис. 4. Поля температур ( $T$ , К) и концентраций ( $\mu_v$ ) летучих веществ в момент зажигания измельченного угля несколькими частицами при разном расстоянии между источниками при  $T_p = 1100$  К.

а —  $t_d = 0,355$  с при  $L = 0,5$ , б —  $t_d = 0,491$  с при  $L = 1$ .

Рис. 5. Зависимости времен задержки зажигания измельченного угля от начальной температуры источника — одиночной частицы.

1 —  $y_p = 3$  мм,  $\gamma = 0,6$ , 2 —  $y_p = 3$  мм,  $\gamma = 1$ ,  
3 —  $y_p = 6$  мм,  $\gamma = 1$ .



Также с использованием модели «одиночная металлическая частица–измельченный уголь–воздух» установлено влияние высоты горячей частицы (кривая 3 на рис. 5) и условий ее теплового контакта со слоем диспергированного твердого топлива (кривая 1 на рис. 5) на характеристики исследуемого процесса. Эти факторы оказывают противоположное влияние на интенсивность процессов теплопереноса в течение индукционного периода, причем более масштабно это влияние проявляется при близких к предельным температурам источника зажигания ( $T_p \approx 1100$  К).

Эти факторы оказывают противоположное влияние на интенсивность процессов теплопереноса в течение индукционного периода, причем более масштабно это влияние проявляется при близких к предельным температурам источника зажигания ( $T_p \approx 1100$  К).

В условиях идеального контакта горячей металлической частицы и измельченного угля теплота поступает в приповерхностный слой последнего только за счет теплопроводности. Уменьшение площади контакта стальной частицы и диспергированного твердого топлива ( $\gamma < 1$ ) вследствие пористости его структуры ведет к ухудшению условий теплопередачи и увеличению значений основной характеристики процесса — времени задержки зажигания (кривая 1 на рис. 5) — по сравнению со случаем идеального теплового контакта (кривая 2 на рис. 5) до 20 %. Часть теплоты передается от источника в топливо теплопроводностью, а часть (в областях газового зазора толщиной в единицы или десятки микрон) — за счет излучения, что снижает интенсивность процесса инициирования горения вследствие менее существенного влияния лучистого потока в области пор на условия теплопередачи по сравнению с теплопереносом за счет кондукции в приповерхностном слое измельченного угля без учета его гетерогенной структуры.

По результатам математического моделирования установлено, что при близких к предельным условиям зажигания вероятность газофазного воспламенения слоя диспергированного бурого угля возрастает с увеличением высоты выпадающей на его поверхность горячей частицы. Выполненный анализ позволяет сделать вывод о том, что при  $T_p < 1200$  К изменение  $y_p$  с 3 до 6 мм ведет к снижению времен задержки зажигания до 15 % и предельных начальных температур источника зажигания на 30 К (рис. 5). Полученный результат можно объяснить следующим. В области относительно невысоких  $T_p$  большое влияние на характеристики индукционного периода оказывают процессы теплопереноса в окрестности локального источника энергии. При увеличении высоты металлической частицы возрастает площадь поверхности нагрева газовой смеси, что интенсифицирует процесс окисления летучих веществ.

### Заключение

В результате проведенных численных исследований в рамках математической модели для плоской постановки рассматриваемой задачи установлено, что максимальное отличие времен задержки зажигания измельченного бурого угля марки 2Б Шивэ-Овооского месторождения Монголии при нагревании одиночной и двумя стальными частицами достигает 48 %. При увеличении начальной температуры источников энергии ( $T_p > 1250$  К) масштаб совместного влияния частиц на время задержки зажигания уменьшается. Значение параметра  $L = 1,5$ , характеризующего расстояние между горячими частицами, является предельным, при котором соседние частицы еще оказывают совместное влияние на интенсивность процессов теплопереноса в течение индукционного

периода. Результаты, полученные при  $T_p > 1250$  К,  $L > 1,5$  позволяют сделать вывод о том, что анализ характеристик и закономерностей тепломассопереноса при зажигании слоя твердого топлива несколькими частицами в этих условиях можно выполнять в рамках модели «одиночная металлическая частица–измельченный уголь–воздух».

Также с использованием рассмотренной модели показано, что увеличение высоты горячей частицы (с 3 до 6 мм) интенсифицирует процессы тепломассопереноса в газовой среде, что ведет к уменьшению времен задержки до 15 % и снижению на 30 К начальных температур источника, необходимых для зажигания измельченного твердого топлива. Условия же неидеального теплового контакта на границе «металлическая частица–измельченный уголь», обусловленные пористостью структуры последнего, ухудшают теплопередачу в приповерхностный слой топлива. Времена задержки зажигания возрастают до 20 % по сравнению со случаем идеального теплового контакта, когда теплота поступает в приповерхностный слой диспергированного угля только за счет теплопроводности.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод о высокой практической значимости результатов выполненного исследования вследствие широкого распространения в энергетике России бурых углей марок 2Б и 3Б Центрально-Сибирского бассейна, которые схожи по свойствам с твердым натуральным топливом марки 2Б Шивэ-Овооского месторождения Монголии. Также полученные результаты могут быть использованы в качестве первого приближения для оценки опасности возникновения возгораний или развития пожаров при взаимодействии горячих частиц с измельченными бурыми углями, имеющими аналогичные характеристики с твердым топливом марок 2Б и 3Б месторождений Канско-Ачинского бассейна России и Шивэ-Овооского месторождения Монголии.

### Список литературы

1. Тугов А.Н., Вихрев Ю.В. Развитие тепловой энергетики Китая // Энергетик. 2008. № 2. С. 34–36.
2. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. М.: ИНЭИ РАН, 2013. 110 с.
3. Бурдуков А.П., Попов В.И., Чернова Г.В., Чернецкий М.Ю., Дектерев А.А., Чернецкая Н.С., Маркова В.М., Чурашев В.Н., Юсупов Т.С. Разработка технологии использования механоактивированных углей микропола для розжига и подсветки угольных котлов действующих ТЭС // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 40–46.
4. Богомолов А.Р., Алексеев М.В., Сорокин А.Л., Прибатурин Н.А., Кагакин Е.И., Шевырѐв С.А. Исследование конверсии углей и шламов в потоке перегретого пара // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 33–39.
5. Донской И.Г., Кейко А.В., Козлов А.Н., Свищѐв Д.А., Шаманский В.А. Расчет режимов слоевой газификации угля с помощью термодинамической модели с макрокинетическими ограничениями // Теплоэнергетика. 2013. № 12. С. 56–61.
6. Кузнецов Б.Н., Щипко М.Л., Чесноков Н.В., Милошенко Т.П., Сафонова Л.В., Веприкова Е.В., Жижжев А.М., Павленко Н.И. Получение пористых углеродных материалов высокоскоростным нагревом и предварительной химической модификацией антрацитов // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13, № 4. С. 521–529.
7. Стороженко Г.И., Столбоушкин А.Ю., Иванов А.И. Переработка углистых аргиллитов для получения керамического сырья и технологического топлива // Строительные материалы. 2015. № 8. С. 50–59.
8. Осинцев К.В., Осинцев В.В., Джундубаев А.К., Ким С.П., Альмусин Г.Т., Акбаев Т.А., Богаткин В.И. Получение активированного угля с использованием оборудования ТЭС и котельных // Теплоэнергетика. 2013. № 8. С. 57–64.
9. Joshi K.A., Raghavan V., Rangwala A.S. An experimental study of coal dust ignition in wedge shaped hot plate configurations // Combustion and Flame. 2012. Vol. 159, No. 1. P. 376–384.
10. Janes A., Carson D., Accorsi A., Chaineaux J., Tribouilloy B., Morainvillers D. Correlation between self-ignition of a dust layer on a hot surface and in baskets in an oven // J. of Hazardous Materials. 2008. Vol. 159, No. 2–3. P. 528–535.
11. Захаревич А.В., Богомолов А.Р. О влиянии условий теплопередачи на характеристики зажигания диспергированного твердого топлива // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 11. С. 40–43.
12. Shebeko A.Y., Shebeko Y.N., Zuban A.V., Golov N.V. An investigation of an ignition of flammable gaseous mixtures with mechanical sparks // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 78. P. 122–129.
13. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. On the scale of «simultaneous» influence of several «hot» particles on the conditions of heat and mass transfer at ignition of liquid condensed substance // J. of Engng Thermophysics. 2009. Vol. 18, No. 4. P. 263–270.

14. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Исследование интегральных характеристик зажигания полимерного материала несколькими нагретыми до высоких температур частицами // Пожарная безопасность. 2013. № 4. С. 27–35.
15. Заворин А.С., Долгих А.Ю., Саломатов В.В., Батмунх С., Энхжаргал Х. Теплотехнические характеристики углей месторождения Шивэ-Овоо Монголии как энергетического топлива // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 324, № 4. С. 47–53.
16. Каталымов А.В., Кобяков А.И. Переработка твердого топлива: учеб. пособие для вузов. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. 248 с.
17. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание конденсированных веществ при локальном нагреве. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2010. 270 с.
18. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О возможности использования одномерной модели при численном анализе процесса зажигания жидкого конденсированного вещества одиночной нагретой частицей // Физика горения и взрыва. 2010. Т. 46, № 6. С. 78–85.
19. Irawan D., García-Fernández A., Gutiérrez A.J., Álvarez E., Blanco E. Modeling of coil cooling using 2D and 3D Computational Fluid Dynamics (CFD) // Int. Congress on Water, Waste and Energy Management. Rome (Italy), 18–20 July 2016. P. 457–458.
20. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 502 с.
21. Буркина Р.С., Микова Е.А. Высокотемпературное зажигание реакционноспособного вещества горячей инертной частицей с конечным запасом тепла // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45, № 2. С. 40–47.
22. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. М.: Недра, 1980. 256 с.
23. Агроскин А.А., Гончаров Е.И., Тягунов В.М., Зубин И.Г., Глейбман В.Б. Зависимость тепловых свойств углей от насыпной массы, скорости коксования и времени изотермической выдержки // Кокс и химия. 1977. № 8. С. 12–15.
24. Wang S., Chen H., Liu N. Ignition of expandable polystyrene foam by a hot particle: an experimental and numerical study // J. of Hazardous Materials. 2015. Vol. 283. P. 536–543.
25. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Heat and mass transfer at ignition of solid condensed substance with relatively low calorific power by a local energy source // J. of Engng Thermophysics. 2012. Vol. 21, No. 1. P. 69–77.
26. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: ООО «Старс», 2006. 720 с.
27. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. Справочное руководство. М.: Физматгиз, 1959. 356 с.
28. Бойко Е.А., Дидичин Д.Г., Шишмарев П.В. Кинетика термохимических превращений углей Канско-Ачинского бассейна // Химия твердого топлива. 2004. № 3. С. 3–12.
29. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Об устойчивости зажигания смесового твердого топлива локальным источником ограниченной энергоемкости // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50, № 6. С. 54–60.
30. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

*Статья поступила в редакцию 4 мая 2016 г.,  
после доработки — 30 сентября 2016 г.*