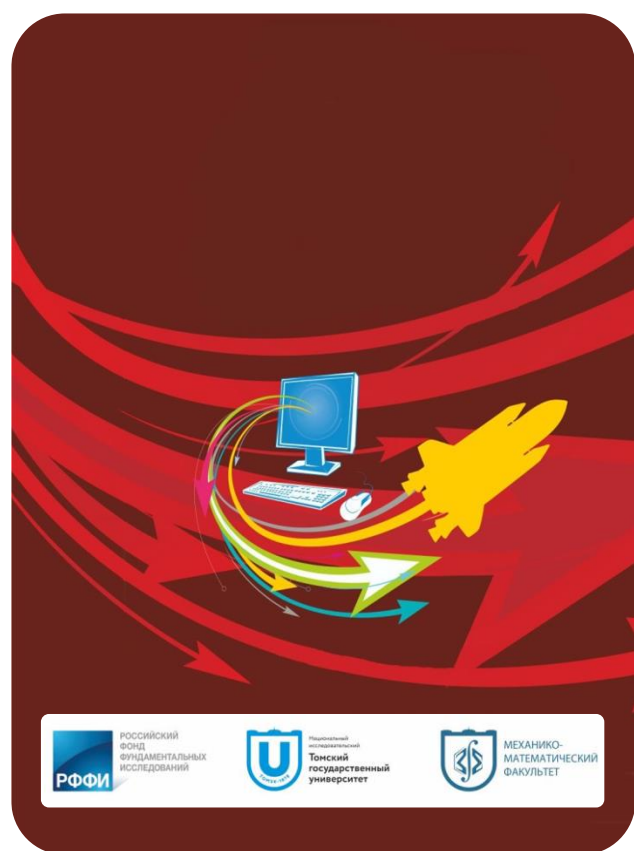


Национальный исследовательский
Томский государственный университет
Механико-математический факультет
Кафедра физической и вычислительной механики



Материалы

XXI Всероссийской
научной конференции с
международным участием

"Сопряженные задачи
механики реагирующих
сред, информатики и
экологии"



17 – 19 сентября 2018г.
г. Томск

Молодёжная секция

А. И. Решетова «Численное моделирование взаимодействия длинноволновых возмущений с ударной волной на пластине в потоке колебательно возбужденных газов».....	150
С. А. Акинин, К. Ю. Тимофеев «Экспериментальное и численное моделирование истечения воздуха через канал слива пограничного слоя».....	153
С. Н. Новоселов, К. М. Моисеева «Математическое моделирование сгорания бидисперсного и полидисперсного порошка угольной пыли в замкнутом объеме»	156
А. О. Турчинович, Т. А. Коротаева, М. А. Гольдфельд, Е. А. Ободовская «Численное моделирование слива пограничного слоя через одиночный канал при гиперзвуковых скоростях внешнего потока».....	160
Д. А. Гусякова, Г. И. Васильева «Оценка неучтенной экологической нагрузки республики Бурятия от лесных пожаров»	165
Е. И. Дауэнгауэр, Р. И. Мулладжанов «Численное моделирование гидропрофиля в прямоугольном канале методом крупных вихрей»	167
Е. П. Магденко «Исследование термокапиллярной неустойчивости двухслойной системы жидкостей в конечном цилиндре»	171
Н. Е. Шлегель, А. О. Жданова, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак «О роли процесса испарения воды в подавлении термического разложения лесного горючего материала».....	174
А. Г. Нигай, О. С. Яшутина «Исследование закономерностей и характеристик зажигания и горения капель гелеобразного топлива»	177

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СГОРАНИЯ БИДИСПЕРСНОГО И ПОЛИДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЗАМКНУТОМ ОБЪЕМЕ

С. Н. Новоселов, К. М. Моисеева

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина 36

Настоящая работа посвящена решению задачи сжигания взвеси угольной пыли в воздухе. Газовзвеси твердых горючих – вид дисперсных систем, который широко применяется в энергетике, ракетной технике, пиротехнике. Возникает много проблем, связанных с воспламенением и горением таких систем. Основные физико-химические закономерности воспламенения и горения газовзвеси зависят от температуры, состава окислителя, дисперсности и концентрации горючего [1]. Например, закономерности воспламенения и горения газовзвесей были описаны в статьях [2 - 4].

В работе [2] показано, что нормальная скорость пламени гибридной газовзвеси возрастает с уменьшением размера частиц и увеличением концентрации горючего и окислителя. В работе [3] проведен эксперимент по сжиганию наноаэрозоля угольной пыли в метано-воздушной смеси. Сделан вывод о наличии наноаэрозоля во взвеси угольной пыли в бедной метано-воздушной смеси, являющейся побочным продуктом добычи угля в шахтах. Кроме того, показано, что присутствие наноразмерного аэрозоля приводит к увеличению скорости роста давления в замкнутом сферическом сосуде.

Математическое моделирование задачи о сжигании полидисперсной взвеси угольной пыли выполнено в [4]. В работе показано, что при малых массах угольной пыли увеличение процентного содержания летучих частиц в смеси приводит к увеличению максимального давления в объеме. При больших массах угольной пыли с увеличением процентного содержания летучих частиц в пыли величина максимального давления уменьшается.

В данной работе решена задача о сжигании полидисперсной аэровзвеси угольной пыли в замкнутом объеме с теплоотводом в окружающую среду. Постановка задачи основана на работах [3 - 4].

Принятые допущения:

- Учитывается тепловое излучение от частиц.
- Учитывается теплоотдача от газа в окружающую среду.
- Математическая постановка задачи учитывает выход летучих компонент при нагреве частиц и дальнейшее их горение.
- Учитывается зависимость коэффициента теплопроводности газа от температуры.
- Учитывается расход окислителя на гетерогенную реакцию первого порядка на поверхности частиц и гомогенную реакцию второго порядка между кислородом и летучими в газе.

- Выход летучих компонент из частиц задается реакцией первого порядка по закону Аррениуса.

Для заданных допущений математическая постановка задачи имела вид:

Уравнение энергии для газа:

$$c_g \rho_g \frac{dT_g}{dt} = \frac{\alpha_s S}{V} (T_s - T_g) + Q_1 \rho_1 \rho_2 k_{01} \exp\left(\frac{-E_1}{RT_g}\right) + \sum_{i=1}^N n_i \left[\alpha_{k,i} S_{k,i} (T_{k,i} - T_g) - (c_k T_{k,i} - c_g T_g) \frac{dm_{k,i}}{dt} \right]. \quad (1)$$

Уравнение энергии для частиц i -ой фракции:

$$c_k m_{k,i} \frac{dT_{k,i}}{dt} = Q_2 S_{k,i} n_{k,i} j_{2,i} - Q_3 j_{3,i} - \alpha_{k,i} S_{k,i} n_{k,i} (T_{k,i} - T_g) + \frac{\alpha_{iz} S}{V} (T_s - T_{k,i}) - c_k T_{k,i} (n_{k,i} j_{2,i} S_{k,i} + j_{3,i}), \quad i = 1..N. \quad (2)$$

Уравнение изменения массы частиц i -ой фракции:

$$\frac{dm_{k,i}}{dt} = 4\pi r_{k,i}^2 \rho_{k,i} \frac{dr_{k,i}}{dt} + \frac{4}{3} \pi r_{k,i}^3 \frac{d\rho_{k,i}}{dt}, \quad i = 1..N. \quad (3)$$

Уравнение изменения радиуса частиц i -ой фракции:

$$\frac{dr_{k,i}}{dt} = -\frac{j_{1,i}}{\rho_{k,i}}, \quad i = 1..N. \quad (4)$$

Уравнение изменения плотности частиц i -ой фракции в связи с выходом летучего компонента:

$$\frac{d\rho_{k,i}}{dt} = j_{2,i}, \quad i = 1..N. \quad (5)$$

Уравнение изменения парциальной плотности окислителя:

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -\alpha_1 \rho_1 \rho_2 k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_g}\right) - \sum_{i=1}^N \alpha_2 S_{k,i} j_{1,i} n_i. \quad (6)$$

Уравнение изменения парциальной плотности горючего:

$$\frac{d\rho_2}{dt} = -\alpha_3 \rho_1 \rho_2 k_{01} \exp\left(-\frac{E_1}{RT_g}\right) - \sum_{i=1}^N \alpha_4 V_{k,i} j_{2,i} n_i. \quad (7)$$

Уравнение сохранения массы газовзвеси:

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N n_i m_{k,i} + \rho_g \right) = 0. \quad (8)$$

Уравнение состояния газа:

$$P = \rho_g T_g \frac{R}{\mu_g}. \quad (9)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} T_g(0) &= T_{g,st}, T_k(0) = T_{k,st}, \rho_k(0) = \rho_{k,st}, \\ m_k(0) &= \frac{4}{3}\pi r_{st}^3 \rho_{k,st}, \rho_g(0) = \rho_{g,st}, r_k(0) = r_{k,st}, \quad (10) \\ \rho_1(0) &= \rho_{1,st}, \rho_2(0) = 0. \end{aligned}$$

В уравнениях (1) – (10) приняты следующие обозначения $\lambda_g(T) = \lambda_{g,st} \sqrt[3]{(T_g/T_{g,st})^2}$ – коэффициент теплопроводности газа; $\alpha_s = \lambda_g(T) Nu / r_s$ – коэффициент теплообмена газа с боковой поверхностью «бомбы»; $\alpha_k = \lambda_g(T) Nu / (2r_k)$ – коэффициент теплообмена газа с одиночной частицей; $\beta_m = \lambda_g(T) Nu_D / (c_g \rho_g r_k)$ – коэффициент массоотдачи частиц [5]; $\alpha_{iz} = \sigma \varepsilon (T_k^2 + T_s^2) (T_k + T_s)$ – коэффициент теплообмена излучением от общей массы частиц в окружающую среду; $j_2 = \rho_1 \frac{\beta_m k_{02} \exp(-E_2 / (RT_K))}{\beta_m + k_{02} \exp(-E_2 / (RT_K))}$ – скорость гетерогенной реакции на поверхности частицы; $j_3 = -m_l k_{03} \exp(-E_3 / (RT_K))$ – скорость гомогенной реакции газификации летучей компоненты частицы; T – температура; c – теплоемкость; m – масса; n – количество частиц в единице объема; R – универсальная газовая постоянная; r – радиус; V – объем; S – площадь поверхности; j_2 – скорость гетерогенной реакции; j_3 – скорость гомогенной реакции газификации летучих компонентов; Q – тепловой эффект реакции; E – энергия активации; k_0 – предэкспонент в законе Аррениуса; ρ_g – плотность газа; ρ_1 – парциальная плотность окислителя в смеси; ρ_2 – парциальная плотность горючего в смеси; μ – молярная масса; λ – коэффициент теплопроводности; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – степень черноты в законе Стефана-Больцмана. Индексы: g – параметры газа; k – параметры частиц; l – параметры летучих компонент, S – параметры окружающей среды и сосуда; iz – излучение; st – начальные параметры, i – номер фракции частиц.

Метод решения соответствовал работе [4]. Задача решалась методом Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим выбором шага [6].

Параметры расчета задавались равными [4, 7] $Nu = 1$; $E_1 = 81.7 \text{ кДж/моль}$; $k_{01} = 8.4 \cdot 10^4 \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$; $Q_1 = 19.82 \text{ МДж/кг}$; $V = 10^{-2} \text{ м}^3$; $R = 8.31 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_g = 1065 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $c_k = 1464.4 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $\rho_k^0 = 1400 \text{ кг}/(\text{м}^3)$; $\rho_{g,st} = 1.2 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\varepsilon = 0.8$. Кинетические параметры реакции для частиц: $Q_2 = 20 \text{ МДж/кг}$ – тепловой эффект гетерогенной реакции на частицах; $Q_3 = 0.18 \text{ МДж/кг}$ – тепловой эффект от реакции выделения летучей компоненты из частиц; $E_2 = 135 \text{ кДж/моль}$, $E_3 = 209 \text{ кДж/моль}$ – энергия активации для гетерогенной реакции на частицах и реакции выделения летучей компоненты;

$k_{02} = 79 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{с}$ – предэкспоненциальный множитель для гетерогенной реакции на частицах, $k_{03} = 5.83 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ – предэкспоненциальный множитель реакции выделения летучей компоненты.

На первом этапе была решена задача о сжигании бидисперсной аэрозвеси угольной пыли в замкнутом объеме с теплоотводом в окружающую среду. Были получены следующие закономерности воспламенения смеси. Сперва частицы разогреваются до температуры 500-600 К, при этой температуре начинается выделение летучих компонентов. При температуре 850-900 К летучие компоненты начинают гореть, в результате чего частицы разогреваются еще сильнее и воспламеняются. Далее идут две параллельные реакции на частицах и в газе. Быстрее всего воспламеняются самые мелкие частицы, так как они нагреваются быстрее крупных.

Ниже представлены результаты расчета задачи сжигания бидисперсной аэрозвеси угольной пыли в замкнутом объеме. Представлены зависимости скорости роста давления в объеме от параметров угольной пыли.

На рис. 1 – 2 представлены примеры получившихся результатов расчета. На рис. 1 представлен результат расчета сгорания смеси с общей массовой концентрацией $0.05 \text{ кг}/\text{м}^3$. Кривая 1, рис. 1, соответствовала случаю, когда частицы радиуса $r_{k,2}$ имели большую массу $m_2 = 0.03 \text{ кг}/\text{м}^3$, чем частицы радиуса $r_{k,1}$. Время сгорания угольной пыли составило 3.14 с. Кривая 2, рис. 1, соответствует случаю, когда большую массу $m_1 = 0.03 \text{ кг}/\text{м}^3$ имели частицы радиуса $r_{k,1}$. Время сгорания смеси составило 3.2 с. В данном случае время сгорания угольной пыли почти не изменилось.

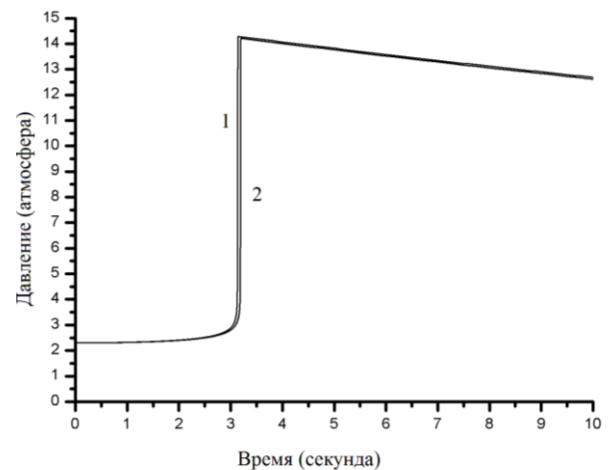


Рис. 1. $r_{k,1} = 10^{-5} \text{ м}$, $r_{k,2} = 10^{-6} \text{ м}$. Кривые:

$$1 - m_1 = 0.02 \text{ кг}/\text{м}^3, m_2 = 0.03 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$2 - m_1 = 0.03 \text{ кг}/\text{м}^3, m_2 = 0.02 \text{ кг}/\text{м}^3$$

На рис. 2 представлены результаты расчета смеси с радиусом частиц $r_{k,1} = 10^{-5} \text{ м}$, $r_{k,2} = 10^{-7} \text{ м}$

с общей массовой концентрацией угольной пыли 0.1 кг/м^3 . Отличие кривых 1, 2 заключается в разном процентном содержании мелкодисперсной фракции частиц. Для кривой 1 процентное содержание мелких частиц составило 80 % от общей массы пыли, для кривой 2 процентное содержание мелких частиц уменьшилось до 60 %. Согласно полученным результатам уменьшение процентного содержания мелкодисперсной фракции частиц привело к увеличению времени сгорания взвеси угольной пыли. Сравнение рис. 1 и 2 показало, что увеличение массы частиц приводит к увеличению максимального давления, достигаемого в объеме.

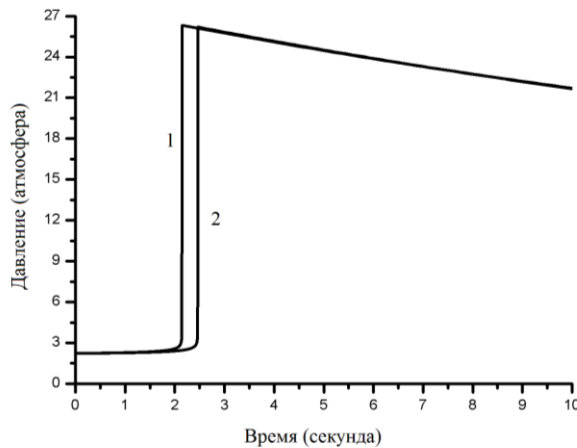


Рис. 2. $r_{k,1} = 10^{-5} \text{ м}$, $r_{k,2} = 10^{-7} \text{ м}$. Кривые:

$$1 - m_1 = 0.02 \text{ кг/м}^3, m_2 = 0.08 \text{ кг/м}^3;$$

$$2 - m_1 = 0.04 \text{ кг/м}^3, m_2 = 0.06 \text{ кг/м}^3$$

На втором этапе были выполнены расчеты для полидисперсной взвеси частиц, состоящей из трех фракций. Были выполнены параметрические расчеты для частиц с радиусами $r_{k,1} = 10^{-5} \text{ м}$, $r_{k,2} = 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 10^{-7} \text{ м}$ с содержанием летучих компонент $V_c = 0.4$. В расчетах общая массовая концентрация варьировалась по фракциям, в сумме образуя массу $m = m_1 + m_2 + m_3 = 0.1 \text{ кг/м}^3$. Примеры полученных результатов представлены на рис. 3 – 4.

На рис. 3 кривая 1 соответствовала случаю, когда частицы радиуса $r_{k,3} = 10^{-7} \text{ м}$ имели самую большую массу, $m_3 = 0.06 \text{ кг/м}^3$. Время сгорания угольной пыли составило 2.4 с. Кривая 2 соответствовала случаю, когда самую большую массу, $m_2 = 0.06 \text{ кг/м}^3$, имели частицы радиуса $r_{k,2} = 10^{-6} \text{ м}$. Время сгорания: смеси в этом случае составило 3.5 с. Таким образом, при изменении распределения по массе частиц время сгорания угольной пыли увеличилось от 2.4 с до 3.5 с.

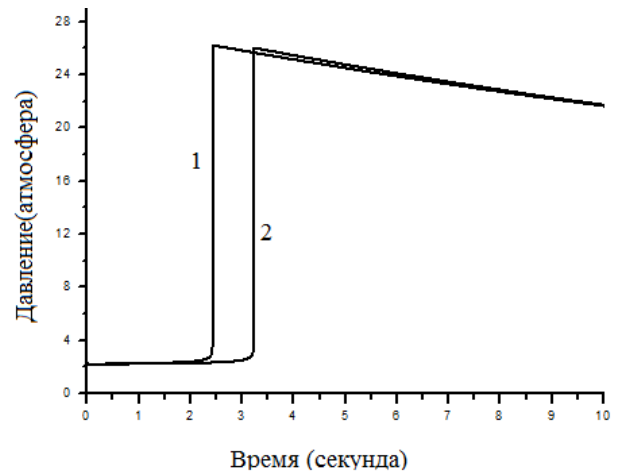


Рис. 3. $r_{k,1} = 10^{-5} \text{ м}$, $r_{k,2} = 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 10^{-7} \text{ м}$.

Кривые: 1 – $m_1 = 0.02 \text{ кг/м}^3$, $m_2 = 0.02 \text{ кг/м}^3$,
 $m_3 = 0.06 \text{ кг/м}^3$; 2 – $m_1 = 0.02 \text{ кг/м}^3$,
 $m_2 = 0.06 \text{ кг/м}^3$, $m_3 = 0.02 \text{ кг/м}^3$

На рис. 4 представлены результаты расчета смеси с такими же, как на рис. 3, радиусами частиц и распределением массы частиц по размерам $m_1 = 0.02 \text{ кг/м}^3$, $m_2 = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $m_3 = 0.04 \text{ кг/м}^3$ (кривая 1) и $m_1 = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $m_2 = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $m_3 = 0.02 \text{ кг/м}^3$ (кривая 2). В этом случае менялось соотношение между самыми крупными и самыми мелкими частицами. Согласно результатам расчета в случае, когда наибольшую массу имели мелкие частицы, время сгорания угольной пыли составило 2.7 с. В случае, когда наибольшую массу имели самые крупные частицы, время сгорания составило 3.2 с.

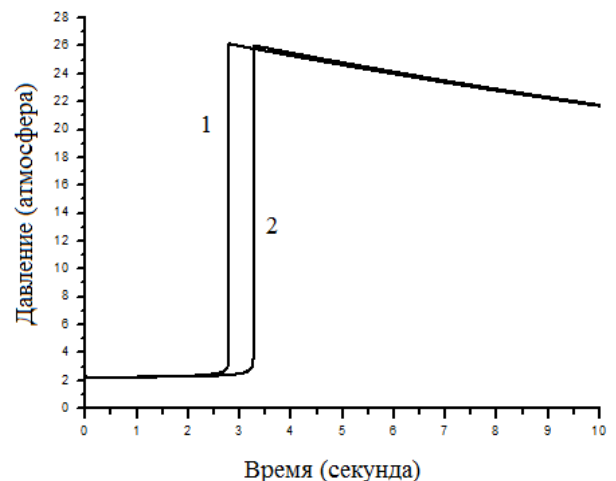


Рис. 3. $r_{k,1} = 10^{-5} \text{ м}$, $r_{k,2} = 10^{-6} \text{ м}$, $r_{k,3} = 10^{-7} \text{ м}$.

Кривые: 1 – $m_1 = 0.02 \text{ кг/м}^3$, $m_2 = 0.04 \text{ кг/м}^3$,
 $m_3 = 0.04 \text{ кг/м}^3$; 2 – $m_1 = 0.04 \text{ кг/м}^3$,
 $m_2 = 0.04 \text{ кг/м}^3$, $m_3 = 0.02 \text{ кг/м}^3$

Из сравнения рис. 3 и 4 следует вывод, что быстрее всего сгорает смесь с наибольшим содержанием мелкодисперсной фракции. Это объясняется тем, что мелкие частицы быстро нагреваются и начинают гореть, что приводит к более быстрому зажиганию всей смеси.

Выводы. Выполнено параметрическое исследование задачи сжигания полидисперсной аэровзвеси частиц.

Для бидисперсной взвеси показано, что время сгорания меньше для смеси с большим содержанием мелких частиц. Показано, что максимальное давление газа, достигаемое при сжигании взвеси, зависит от массы взвеси.

Из результатов расчета смеси, состоящей из трех фракций, получено, что время зажигания сильно зависит от содержания мелкодисперсной фракции.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-79-20011).

Литература

1. Хаджинов Е.А. Экспериментальное исследование кинетики сгорания одиночных угольных частиц// Вестник Приазовского Державского технического университета. – 2013. – Вып. 26. – С. 121-128.
2. Сидоров А.Е., Шевчук В.Г. Ламинарное пламя в мелкодисперсных пылях /А.Е. Сидоров, В.Г. Шевчук// Физика горения и взрыва. – 2011. – т. 47. – № 5. – С. 24-28.
3. Бакланов А. М., Валиулин С. В., Дубцов С. Н., Замашников В. В., член-корреспондент РАН Клишин В. И., академик РАН Конторович А. Э., Коржавин А. А., Онищук А. А., Палеев Д. Ю., Пуртов П. А. Наноаэрозольная фракция в техногенной угольной пыли и ее влияние на взрывоопасность пыле-метано-воздушных смесей// Доклады академии наук, 2015, Т. 461, № 3, с. 295–299.
4. Крайнов А.Ю., Моисеева К.М., Палеев Д. Ю. Численное исследование сгорания полидисперсной газовзвеси угольной пыли в сферическом объеме// Компьютерные исследования и моделирование – 2016 – Т. 8, № 3, С. 531 – 539.
5. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987.
6. Крайнов А.Ю., Миньков. Л.Л. Численные методы решения задач тепло- и массопереноса/А.Ю. Крайнов, Л.Л. Миньков// Томск : STT , 2016.
7. Бойко Е. А. Реакционная способность энергетических углей: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011.