

УДК 536.468

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАЖИГАНИЯ СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ЛОКАЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ОГРАНИЧЕННОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ

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

Томский политехнический университет, 634050 Томск, dmitriyog@tpu.ru

Выполнено численное моделирование твердофазного зажигания смесового топлива одиночной, нагретой до высокой температуры металлической частицей в форме диска малого размера. В координатах «амплитуда теплового потока — время задержки зажигания» выделена область устойчивого инициирования горения типичного смесового твердого топлива при локальном нагреве источником ограниченной энергоемкости. Проведено сопоставление предельных амплитуд тепловых потоков при зажигании конденсированного вещества в условиях кондуктивного и радиационного нагрева.

Ключевые слова: смесовое топливо, зажигание, устойчивость, локальный источник энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Изучению закономерностей и характеристик физико-химических процессов, протекающих при зажигании и горении высокоэнергетических материалов (топлив), посвящено достаточно много работ [1–19]. Это обусловлено практической значимостью результатов исследований. Одной из основных задач [12] до настоящего времени остается определение условий устойчивости переходного процесса, когда стадия инициирования сменяется стационарным самоподдерживающимся горением конденсированного вещества без дополнительного подвода энергии от внешнего источника. Реализация таких режимов зажигания возможна при конвективном (высокотемпературные газы), радиационном (импульс излучения) и кондуктивном (разогретые пластины, частицы) нагреве приповерхностного слоя топлива. Эти механизмы инициирования горения известны достаточно давно [1]. Наибольшее распространение [20–22] получили методы зажигания при конвективном или радиационном подводе энергии. Нагрев топлива потоком излучения или высокотемпературными газами может происходить как в течение достаточно короткого промежутка времени при высоком значении амплитуды теплового потока от поверхности в глубь вещества, так и продолжаться длительное время при воздействии менее мощных

источников. Например, при численном исследовании [12] зажигания энергетических материалов (составы Н и Н + 1 % сажи) световым импульсом различной формы (прямоугольной, линейно убывающей и экспоненциально убывающей) установлены области устойчивого инициирования горения в широком диапазоне изменения амплитуды излучения. Левая граница этой области при зажигании относительно непрозрачного энергетического материала характеризуется наименьшей интенсивностью излучения ($q_0 \approx 160 \text{ кВт/м}^2$) в виде прямоугольного импульса по сравнению с остальными формами поджигающего импульса. Большой интерес представляет определение области устойчивого зажигания типичного смесового твердого топлива локальным источником энергии при кондуктивном нагреве и сопоставление предельных условий (амплитуд теплового потока от поверхности в глубь вещества) с аналогичными характеристиками [12] при радиационном подводе энергии.

В отличие от конвективного и радиационного механизмов нагрева, воспламенение конденсированного вещества при локальном (кондуктивном) источнике энергии возможно лишь в определенном температурном интервале, когда теплового потока в зону возможного зажигания достаточно для прогрева и инициирования самоподдерживающегося экзотермического процесса [7]. Экспериментально установлено [7], что одиночные, нагретые до высокой температуры металлические частицы малых размеров являются источниками устойчивого зажигания модельного состава (перхлорат

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ в рамках научного проекта МК-2391.2014.8.

аммония + 14 % бутилкаучука + 6 % хинолового эфира) смесевое топливо. Зарегистрировано стабильное распространение пламени от очага (в малой окрестности «горячей» частицы) по всей поверхности образца топлива [7], а также полное его сгорание. Исследования [7] были проведены в достаточно узком диапазоне начальной температуры источника энергии ($805 \div 1040$ К), имеющего форму диска размерами $r_p = 3$ мм, $z_p = 2$ мм. По экспериментальной зависимости времени задержки зажигания топливной композиции от температуры «горячей» частицы $t_d = f(T_p)$ установлено лишь минимальное значение начальной температуры источника фиксированных размеров: $T_0 = 805$ К, при котором происходило устойчивое зажигание смесевое топлива. Однако зависимость $t_d = f(T_p)$ [7] не позволяет выявить границы устойчивого зажигания смесевое твердого топлива (СТТ) при варьировании характеристик источника в достаточно широком диапазоне. Поэтому целесообразно проведение численного исследования процессов теплопереноса с описанием химических превращений в конденсированной фазе и выполнение теоретической оценки устойчивости зажигания типичного смесевое твердого топлива при локальном нагреве источником с конечным запасом энергии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическое моделирование физико-химических процессов при зажигании твердого конденсированного вещества выполнено на примере системы, схема которой представлена на рис. 1. Исследовалось смесевое топливо [20–23] с известными теплофизическими

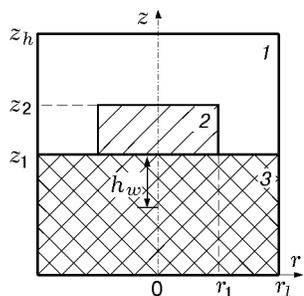


Рис. 1. Схема области решения задачи зажигания:

1 — инертный газ, 2 — «горячая» частица, 3 — смесевое твердое топливо

и кинетическими характеристиками. В качестве локального источника энергии рассматривалась разогретая до высокой температуры стальная частица в форме диска. Ранее установлено [15], что процесс зажигания конденсированных веществ «горячими» частицами такой формы характеризуется средними значениями интегральных характеристик зажигания относительно аналогичных характеристик для полусфер и параллелепипедов.

Принятая схема моделируемого процесса заключается в следующем. В начальный момент времени ($t = 0$) «горячая» частица соприкасается с поверхностью топлива (см. рис. 1), приповерхностный слой которого прогревается за счет тепла локального источника энергии. С ростом температуры скорость реакции окисления экспоненциально возрастает по закону Аррениуса [24]. При достижении предельных условий, соответствующих критериям зажигания, экзотермический процесс приобретает необратимый характер. Происходит твердофазное зажигание топлива.

Известные [25] критерии воспламенения Я. Б. Зельдовича, Д. А. Франк-Каменецкого, А. А. Ковальского и В. Н. Виллюнова сформулированы для условий инициирования горения высокоэнергетических материалов нелокальными источниками энергии (например, высокотемпературные газы, потоки лучистой энергии). При взаимодействии источника ограниченной энергоемкости малых размеров со смесевым твердым топливом приняты следующие условия зажигания:

- 1) скорость теплоприхода в системе (см. рис. 1) за счет экзотермической реакции в приповерхностном слое конденсированного вещества превышает скорость теплоотвода от «горячей» частицы в топливо и окружающий газ;
- 2) температура СТТ в области реакции окисления выше начальной температуры источника энергии.

При проведении численного анализа исследуемого процесса использовались следующие допущения.

1. На границе частица — топливо обеспечивается идеальный контакт. Численная оценка влияния шероховатости поверхности СТТ на характеристики процесса (время задержки зажигания) [14] показала, что относительное отклонение результатов теоретических исследований без учета этого фактора и при учете последнего составляет менее 10 %, т. е. не

превышает границы доверительного интервала результатов экспериментов [7].

2. Не учитывается возможное выгорание топлива. Анализ влияния этого фактора показал [2], что при локальном нагреве конденсированного вещества учет выгорания приводит к увеличению времени задержки зажигания топлива не более чем на 8.3 %. При этом максимальная глубина превращения приповерхностного слоя в течение индукционного периода не превосходит 10 мкм [2, 19].

3. Кинетические параметры экзотермической реакции, протекающей в приповерхностном слое топлива, постоянны. Предполагается реализация одной «глобальной химической реакции» [6], в которой участвует одно способное к экзотермическому реагированию вещество с известными значениями энергии активации и предэкспоненциального множителя [20–23].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Задача зажигания смешанного твердого топлива локальным источником энергии в форме диска решена в цилиндрической системе координат (см. рис. 1). Теплоперенос в «горячей» частице, топливе, газе и процессы экзотермического реагирования в приповерхностном слое при $0 < t < t_d$ в соответствии с основными положениями общей теории теплопереноса в химической кинетике [24–26] описывает следующая система дифференциальных уравнений в частных производных:

уравнение теплопроводности для газа ($r_1 < r < r_l$, $z_1 < z < z_2$; $0 < r < r_l$, $z_2 < z < z_h$):

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} \right); \quad (1)$$

уравнение теплопроводности для «горячей» частицы ($0 < r < r_1$, $z_1 < z < z_2$):

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \right); \quad (2)$$

уравнение энергии для смешанного твердого топлива ($0 < r < r_l$, $0 < z < z_1$):

$$\begin{aligned} \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \\ = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2} \right) + Q_3 W_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Массовая скорость экзотермической реакции в прогретой области приповерхностного слоя СТТ вычислялась по закону Аррениуса [24]:

$$W_3 = \rho_3 k_3^0 \exp \left(-\frac{E_3}{R_t T_3} \right). \quad (4)$$

При постановке задачи приняты следующие обозначения: t — время, с; t_d — время задержки зажигания, с; r , z — координаты цилиндрической системы, м; r_l , z_h — характерные размеры области решения, м; r_p , z_p — размеры источника нагрева ($r_p = r_1$, $z_p = z_2 - z_1$); T — температура, К; λ — теплопроводность, Вт/(м·К); ρ — плотность, кг/м³; c — удельная теплоемкость, Дж/(кг·К); Q_3 — тепловой эффект экзотермической реакции в прогретой области приповерхностного слоя топлива, Дж/кг; k_3^0 — предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; E_3 — энергия активации, Дж/моль; R_t — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); индекс 1 соответствует газу, 2 — «горячей» частице, 3 — топливу.

Начальные условия ($t = 0$):

$$T = T_0; \quad 0 < r < r_l, \quad 0 < z < z_1; \quad r_1 < r < r_l,$$

$$z_1 < z < z_2; \quad 0 < r < r_l, \quad z_2 < z < z_h; \quad (5)$$

$$T = T_g; \quad 0 < r < r_1, \quad z_1 < z < z_2. \quad (6)$$

Граничные условия ($0 < t < t_d$):

$$z = 0, \quad 0 < r < r_l: \quad \frac{\partial T_3}{\partial z} = 0; \quad (7)$$

$$z = z_1, \quad 0 < r < r_1:$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad T_3 = T_2; \quad (8)$$

$$\beta z = z_1, \quad r_1 < r < r_l:$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad T_3 = T_1; \quad (9)$$

$$z = z_2, \quad 0 < r < r_1:$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad T_2 = T_1; \quad (10)$$

$$z = z_h, \quad 0 < r < r_l: \quad \frac{\partial T_1}{\partial z} = 0; \quad (11)$$

$$r = 0, \quad r = r_l, \quad 0 < z < z_1: \quad \frac{\partial T_3}{\partial r} = 0; \quad (12)$$

$$r = 0, z_1 < z < z_2: \quad \frac{\partial T_2}{\partial r} = 0; \quad (13)$$

$$r = 0, z_2 < z < z_h: \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0; \quad (14)$$

$$r = r_1, z_1 < z < z_2:$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}, \quad T_2 = T_1; \quad (15)$$

$$r = r_l, z_1 < z < z_h: \quad \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0. \quad (16)$$

Система дифференциальных уравнений (1)–(3), описывающих процессы теплопереноса при зажигании СТГ, с соответствующими начальными (5), (6) и граничными (7)–(16) условиями решалась методом конечных разностей. Решение разностных аналогов дифференциальных уравнений проводилось локально-одномерным методом. Система одномерных разностных уравнений решалась методом итераций с применением метода прогонки на каждой итерации при использовании неявной четырехточечной разностной схемы. При расчете интегральных характеристик устанавливалось не менее 500 узлов разностной сетки по каждой из координат, шаг по времени составлял 10^{-5} с. В области границы топливо — частица пространственная сетка сгущалась, шаг в направлении z не превышал 20 мкм.

Верификация результатов численного моделирования предусматривала их сравнение с экспериментальными данными [7], а также проверку консервативности используемой разностной схемы по методике, представленной в [27]. Погрешность выполнения закона сохранения энергии в системе (см. рис. 1) составила не более 1.8 %. Тестирование численных методов и элементов алгоритма решения системы дифференциальных уравнений (1)–(3) с краевыми условиями (5)–(16) проведено на примере нелинейных задач теплопроводности [16] и химической кинетики [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численные исследования выполнены при следующих значениях параметров: начальная температура топлива и газа $T_0 = 293$ К, стальной частицы $T_p = 700 \div 1500$ К; размеры частицы $r_p = 1 \div 8$ мм, $z_p = 2$ мм; размеры области решения $r_l = 20$ мм, $z_h = 20$ мм.

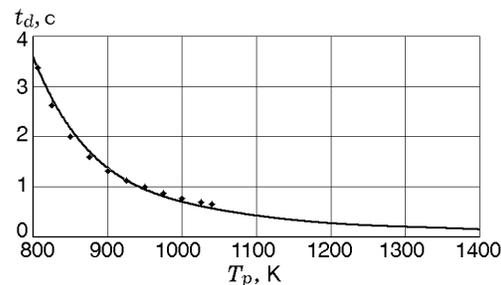


Рис. 2. Теоретическая (линия) и экспериментальная (точки) [7] зависимости времени задержки зажигания топлива от начальной температуры источника энергии при $r_p = 3$ мм

Теплофизические характеристики [21–23, 28–31] веществ (см. рис. 1): $\lambda_1 = 0.026$ Вт/(м·К), $\rho_1 = 1.161$ кг/м³, $c_1 = 1190$ Дж/(кг·К); $\lambda_2 = 49$ Вт/(м·К), $\rho_2 = 7831$ кг/м³, $c_2 = 470$ Дж/(кг·К); $\lambda_3 = 0.418$ Вт/(м·К), $\rho_3 = 1750$ кг/м³, $c_3 = 1260$ Дж/(кг·К).

Кинетические параметры зажигания топлива $E_3 = 50 \cdot 10^3$ Дж/моль, $Q_3 k_3^0 = 0.88 \cdot 10^9$ Дж/(кг·с) определены по экспериментальной зависимости $t_d = f(T_p)$ [7] с использованием методик [21, 22].

При проведении численных исследований установлено, что теоретические и экспериментальные [7] значения времени задержки зажигания смесового топлива при изменении начальной температуры «горячей» частицы хорошо коррелируют между собой (рис. 2). Максимальное отклонение по t_d при фиксированном значении T_p не превышало 5 % и соответствовало интервалу разброса экспериментальных данных [7]. Полученный результат позволяет сделать вывод, что математическая модель (1)–(16) адекватно описывает зажигание СТГ локальным источником энергии в форме диска (см. рис. 1) и может использоваться для анализа интегральных характеристик устойчивости процесса при изменении параметров (например, T_p , r_p) частицы.

В экспериментальном исследовании [7] для вычисления зависимости $t_d = f(T_p)$ проводилось не менее 6 опытов при разных фиксированных значениях начальной температуры локального источника ($r_p = 3$ мм, $z_p = 2$ мм) в диапазоне $T_p = 805 \div 1040$ К. В подавляющем большинстве экспериментов (более 93 %) зафиксировано устойчивое зажигание, характеризующееся распространением пламени от оча-

га по поверхности образца топлива с его полным сгоранием. Воспламенение отсутствовало лишь в предельном случае (при $T_p < 800$ К), когда энергии «горячей» частицы было недостаточно для прогрева топлива и инициирования горения. Результаты экспериментов [7] показывают, что если зажигание высокоэнергетического материала локальным источником ограниченной энергоемкости происходило, то оно было устойчивым.

Относительно условий устойчивости переходного процесса следует отметить, что в соответствии с общей теорией [25] глубина прогрева (h_w) приповерхностного слоя топлива в момент зажигания не может быть меньше аналогичной характеристики при его стационарном горении. Глубина прогрева характеризует размер области в приповерхностном слое вещества, вдоль оси симметрии ($r = 0$) системы (см. рис. 1). Верхняя граница этой области фиксирована и расположена на поверхности топлива. Нижняя граница определяется координатой точки с температурой, отличной от начальной температуры $T_0 = 293$ К на 1 К. При «стоке» тепла локального источника энергии в глубь конденсированной фазы нижняя граница смещается в направлении движения изотермы $T = 294$ К. Для типичного смесового топлива (связующее — бутылкаучук, окислитель — перхлорат аммония) $h_w = 0.02 \div 0.1$ мм [21–23].

При изменении начальной температуры и характерного размера источника энергии установлены (рис. 3, 4) нелинейные зависимости $h_w = f(T_p)$ и $h_w = f(r_p)$ в момент зажигания. Глубина зоны инертного прогрева приповерхностного слоя топлива уменьшается с ростом теплосодержания (за счет начальной температуры и характерного размера) локального

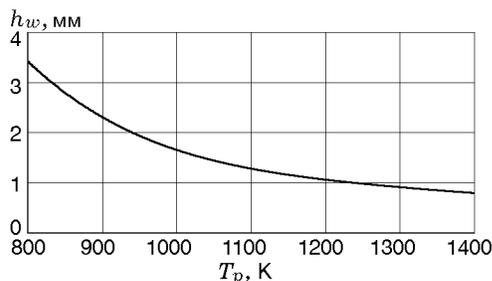


Рис. 3. Зависимость глубины прогрева приповерхностного слоя топлива в момент зажигания от начальной температуры источника энергии при $r_p = 3$ мм

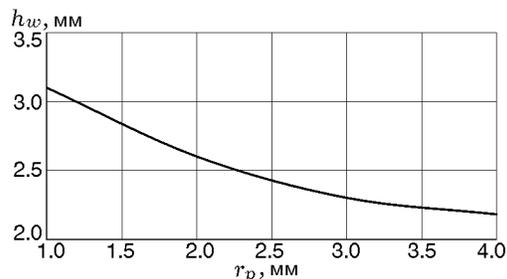


Рис. 4. Зависимость глубины прогрева приповерхностного слоя топлива в момент зажигания от характерного размера источника энергии при $T_p = 900$ К

источника энергии. При $T_p = 1200 \div 1500$ К и $r_p = 4 \div 8$ мм интегральные характеристики процесса, например t_d и h_w , изменяются меньше, чем при относительно малых значениях T_p и r_p . Минимальное значение $h_w = 0.52$ мм (при $T_p = 1500$ К и $r_p = 8$ мм), полученное при численном моделировании, существенно превышает глубину прогретого слоя топлива при его стационарном горении [21, 22]. Зависимости $h_w(T_p)$ и $h_w(r_p)$ можно объяснить тем, что в условиях низкой теплопроводности приповерхностного слоя СТГ повышение теплосодержания одиночной частицы ведет к увеличению теплового потока от источника энергии в топливо и, соответственно, к увеличению скорости роста температуры тонкого приповерхностного слоя. При относительно малом тепловом потоке $q < 250$ кВт/м² градиенты температуры на границе частица — топливо $z = z_1$, $0 < r < r_1$ (см. рис. 1) имеют меньшее значение по сравнению с большими амплитудами теплового потока в приповерхностном слое вещества. Это приводит к интенсификации «стока» тепла в глубь конденсированной фазы, аккумуляции большего количества энергии в глубинных слоях и увеличению зоны прогрева реакционно-способного слоя в течение периода инертного прогрева топлива.

На рис. 5 по аналогии с [12] представлена область устойчивого зажигания смесового топлива источником ограниченной энергоемкости в координатах «амплитуда теплового потока — время задержки зажигания». Границы области определены предельными значениями анализируемых характерных размеров «горячей» частицы: правая верхняя — $r_p = 1$ мм, левая нижняя — $r_p = 8$ мм. Видно, что при изменении теплосодержания «горя-

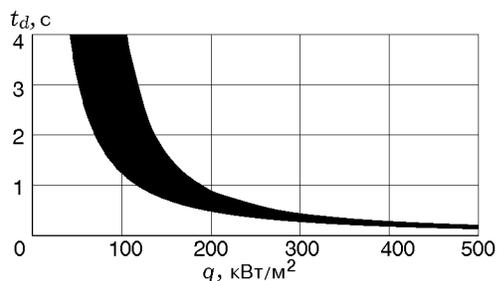


Рис. 5. Область устойчивости зажигания смеси топлива одиночной «горячей» частицей (область затемнена)

чей» частицы (за счет T_p и r_p) можно выделить предельный тепловой поток, ниже которого устойчивое зажигание не реализуется при любой сколь угодно длительной стадии инертного прогрева. При относительно высоких значениях теплового потока изменение теплосодержания «горячей» частицы оказывает меньшее влияние на время задержки зажигания. В случае $q < 400$ кВт/м² область устойчивого зажигания становится значительно шире, что качественно хорошо коррелирует с результатами [12], полученными, например, при воспламенении конденсированного состава Н треугольным импульсом излучения с линейно убывающей амплитудой. Из сравнения интегральных характеристик процессов инициирования горения установлено, что предельное минимальное значение теплового потока, при котором в исследуемой системе реализуется устойчивое зажигание, составляет 30 кВт/м², что на порядок меньше аналогичной характеристики при зажигании баллистического состава импульсом излучения. Полученный результат можно объяснить не только существенным отличием условий нагрева при радиационном и кондуктивном подводе энергии, но и значительным отличием теплофизических и кинетических характеристик конденсированных веществ.

ВЫВОДЫ

1. Численно установлено, что одиночные, нагретые до высокой температуры металлические частицы малого размера являются источниками устойчивого зажигания типичного смеси твердого топлива (перхлорат аммония + 14 % бутилкаучука + 6 % хинолового эфира).

2. Минимальная глубина ($h_w = 0.52$ мм) прогретого приповерхностного слоя в момент устойчивого зажигания топлива при изменении

начальной температуры и характерного размера «горячей» частицы в достаточно широком диапазоне ($T_p = 700 \div 1500$ К и $r_p = 1 \div 8$ мм) существенно превышает установленную теоретически [21, 22] глубину прогретого слоя топлива при его стационарном горении.

3. Значение теплового потока $q = 30$ кВт/м² при кондуктивном теплопереводе от источника энергии в конденсированную фазу является минимальным, при его превышении в системе частица — топливо — газ реализуется устойчивое зажигание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мак-Алеви Р. Ф., Кауан П. Л., Саммерфилд М. Механизм воспламенения смесевых твердых топлив горячими газами // Исследования ракетных двигателей на твердом топливе: сб. статей. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — С. 397–415.
2. Буркина Р. С., Князева А. Г. Исследование очагового теплового воспламенения и режима его вырождения // Физика горения и взрыва. — 1992. — Т. 28, № 3. — С. 3–8.
3. Буркина Р. С., Козлов Е. А. Очаговое тепловое воспламенение в пористой среде в условиях естественной фильтрации газа // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 2. — С. 35–41.
4. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратужкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 78–85.
5. Мальцев Р. В., Ребров А. К. Газодинамические коллаидеры: численное моделирование // ПМТФ. — 2007. — Т. 48, № 3. — С. 142–151.
6. Гусаченко Л. К., Зарко В. Е. Анализ нестационарных моделей горения твердых топлив (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 1. — С. 35–48.
7. Захаревич А. В., Кузнецов В. Т., Кузнецов Г. В., Максимов В. И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2008. — Т. 44, № 5. — С. 54–57.
8. 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.
9. Волчков Э. П., Терехов В. В., Терехов В. И. Характеристики пограничного слоя с горением водорода при вариации тепловых условий на проникаемой стенке // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 3. — С. 3–11.

10. **Бабук В. А.** Свойства поверхностного слоя и закономерности горения металлизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 156–165.
11. **Гусаченко Л. К., Зарко В. Е., Ивания С. П., Рычков А. Д.** Расчет отклика газифицирующегося энергетического материала на действие монохроматического излучения // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 30–41.
12. **Гусаченко Л. К., Зарко В. Е., Рычков А. Д.** Зажигание и гашение гомогенных энергетических материалов световым импульсом // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 1. — С. 80–88.
13. **Ханефт А. В., Дугинов Е. В.** Влияние плавления на критическую энергию зажигания конденсированного взрывчатого вещества коротким лазерным импульсом // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 47–53.
14. **Глушков Д. О., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Численное моделирование твердофазного зажигания металлизированного конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 12. — С. 35–41.
15. **Глушков Д. О., Стрижак П. А.** Влияние формы локального источника энергии на условия зажигания структурно-неоднородного твердого конденсированного вещества // Хим. физика и мезоскопия. — 2012. — Т. 14, № 3. — С. 334–340.
16. **Липанов А. М., Болкисев А. А.** О расчете температурного поля в заряде смесового твердого топлива с учетом гетерогенности его теплофизических свойств // Хим. физика и мезоскопия. — 2012. — Т. 14, № 3. — С. 364–370.
17. **Ассовский И. Г., Мержанов А. Г.** Об адекватности экспериментального и теоретического моделирования горения высокоэнергетических материалов // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 11–21.
18. **Липанов А. М.** Скорость горения твердого топлива как функция давления // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 34–38.
19. **Глушков Д. О.** О влиянии выгорания на интегральные характеристики зажигания металлизированного смесового твердого топлива при локальном нагреве // Хим. физика и мезоскопия. — 2014. — Т. 16, № 1. — С. 52–59.
20. **Штехер М. С.** Топлива и рабочие тела ракетных двигателей. — М.: Машиностроение, 1976.
21. **Тимнат И.** Ракетные двигатели на химическом топливе: пер. с англ. — М.: Мир, 1990.
22. **Цуцуран В. И., Петрухин Н. В., Гусев С. А.** Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив. — М.: МО РФ, 1999.
23. **Новожилов Б. В.** Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
24. **Франк-Каменецкий Д. А.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. — М.: Наука, 1987.
25. **Vilyunov V. N., Zarko V. E.** Ignition of solids. — Amsterdam: Elsevier Sci. Publ., 1989.
26. **Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А.** Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. — М.: Наука, 1984.
27. **Кузнецов Г. В., Стрижак П. А.** Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 42–50.
28. **Чиркин В. С.** Теплофизические свойства материалов. Справочное руководство. — М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959.
29. **Варгафтик Н. Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: ООО «Старс», 2006.
30. **Теплотехнический** справочник. Т. 1 / под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М.: Энергия, 1975.
31. **Теплотехнический** справочник. Т. 2 / под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева. — М.: Энергия, 1976.

*Поступила в редакцию 12/I 2014 г.,
в окончательном варианте — 16/IV 2014 г.*