

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
НИИ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ ТОМСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
СОВЕТ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ТГУ



Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики

Международная молодежная научная конференция

17–19 ноября 2014 г., Томск



Издательство Томского университета
2015

Таким образом, установлено, что при подрыве эмульсионного ВВ во льду образуется майна диаметров более 3,0 м. Следует отметить, что наличие шуги между снегом и льдом не препятствует данному процессу. В данном эксперименте кромка льда более развита, чем при разрушении бесснежного ледяного покрова.

Литература

1. Орлов М.Ю., Орлова Ю.Н. Мобильная лаборатория «Взрывное разрушение льда». Итоги работы за 2013–2014 гг. // Тезисы докладов II Всероссийской научной конференции «Полярная механика». СПб.: Изд-во Крыловского государственного научного центра, 2014. С. 43–44.
2. Орлова Ю.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. С. 26.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СТТ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЙ ФАЗЕ

В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов

Представлена математическая модель горения смесового твердого топлива на основе ПХА с добавлением частиц алюминия, учитывающая тепловой эффект разложения конденсированной фазы, экзотермическую химическую реакцию в газовой фазе, конвекцию и диффузию реагента, нагрев и горение частиц алюминия в потоке газа, движение продуктов сгорания, отставание скорости движения частиц от газа. Учитывается влияние размера и массовой доли вылетающих с поверхности горения частиц металла на скорость горения.

ASCHET VELOCITIES of the COMBUSTION METALLIZIROVANNOGO STT WITH PROVISION FOR PROCESSES In GAS PHASE

V.A. Poryazov, A.YU. Kraynov

The mathematical model of the combustion смесового solid fuel will Presented on base PHA with добавлением the particles aluminum, taking into account heat effect of the decomposition of the condensed phase, экзотермическую chemical reaction in gas phase, convection and diffusion of the reagent, heating and combustion of the particles aluminum in flow of the gas, moving the products of combustion, backlog to velocities of the moving the particles from gas. It Is Taken into account influence of the amount and mass share flying with surfaces of the combustion of the particles of the metal on velocity of the combustion.

Основой большинства современных моделей горения смесовых твердых топлив является модель Германса [1]. Применимость ее для проведения инженерных расчетов сопряженных задач, в частности моделирования эрозионного горения, продемонстрирована в работе [2].

Объектом численного исследования выбрано смесовое твердое топливо на основе перхлората аммония со связующим бутил-каучуком и добавлением частиц алюминия.

Скорость горения смесового топлива рассчитывается как величина, определяемая массовыми потоками компонентов топлива с поверхности горения. Массовый поток компонентов топлива определяется тепловым балансом системы на поверхности топлива, в свою очередь складывающимся из теплового потока из газовой фазы, и суммарным тепловыделением к-фазы. Тепловыделение к-фазы обусловлено экзотермическим процессом разложения окислителя и эндотермическим пиролизом. В газовой фазе происходит экзотермическая химическая реакция первого порядка по закону Аррениуса, конвекция и диффузия реагента, горение происходит в изобарических условиях, давление не зависит от расстояния до поверхности горения, учитывается расширение газа при его нагревании. Частицы алюминия и зерна перхло-

рата аммония представляют собой шарики, размер частиц в составе топлива одинаков, распределение зерен перхлората аммония в объеме топлива равномерное, частицы алюминия равномерно распределены в связующем. Горение частиц алюминия описывается согласно экспериментальным данным [3], воспламенение частиц алюминия происходит при достижении температуры частицы, равной заданной величине [3], теплообмен между частицами и газом происходит по закону Ньютона, движение частиц происходит под действием сил трения со стороны газа, из-за малой объемной концентрации частиц в газе влиянием движения частиц на движение газа пренебрегается, не учитывается агломерация частиц на поверхности конденсированной фазы, однако используются экспериментальные данные по распределению частиц металла по размерам в газовой фазе, обусловленные процессами агломерации, не учитывается взаимодействие частиц друг с другом в газовой фазе.

Математическая постановка задачи состоит из уравнений для определения массовых потоков компонентов топлива, суммарного теплового эффекта к-фазы, сохранения энергии газа и частиц алюминия, сохранения массы газа, массы частиц и числа частиц алюминия, выгорания реагента в газовой фазе, движения частиц в потоке газа, уравнения состояния газа [4].

$$c_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial t} + u \frac{\partial T_2}{\partial x} \right) = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + Y \rho_2 k_0 Q_2 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right) + \sum_i 4\pi \alpha_i r_{k,i}^2 n_i (T_{3,i} - T_2), \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial Y}{\partial t} + u \frac{\partial Y}{\partial x} \right) = D_2 \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} - Y k_0 \exp \left(\frac{-E_2}{R_y T_2} \right), \quad (2)$$

$$c_3 \rho_3 \left(\frac{\partial T_{3,i}}{\partial t} + w_i \frac{\partial T_{3,i}}{\partial x} \right) = -4\pi \alpha_i r_{k,i}^2 n_i (T_{3,i} - T_2) + G_i Q_{\Lambda i} \frac{2\mu_{\Lambda i}}{3\mu_o}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 u)}{\partial x} = -\sum_i G_i, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_{3,i}}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_{3,i} w_i)}{\partial x} = G_i, \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_i \frac{\partial w_i}{\partial x} = -\tau_{tr,i}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial(n_i w_i)}{\partial x} = 0, \quad (7)$$

$$P = \rho_2 R T_2 = \text{const}, \quad (8)$$

$$V_k = (v_f m_f + v_{ox} m_{ox}) / \rho_p, \quad (9)$$

$$Q_s = \alpha_{ox}(Q_{gp} - Q_l) - (v_f H_p + v_{Al} H_{Al}) \frac{m_f}{\rho_l V_k} \quad (10)$$

Принятые обозначения: t – время; x – координата; ρ_2 – плотность газа; ρ_3 – приведенная плотность частиц (масса частиц в единице объема); T – температура; P – давление; u – скорость газа; w – скорость частиц; r_k – размер частицы; n – число частиц в единице объема; c – удельная теплоемкость при постоянном давлении; λ – коэффициент теплопроводности; D – коэффициент диффузии; R – газовая постоянная; R_y – универсальная газовая постоянная; Y – концентрация горючего в газовой фазе; Q_2 – тепловой эффект реакции в газовой фазе; α – коэффициент теплоотдачи; τ_p – сила действия газа на частицы; Q_{Al} – теплота сгорания алюминия; G – скорость изменения массы частиц при их горении; μ_{Al} , μ_O – молярные массы молекул алюминия и кислорода; Q_s – тепловой эффект реакции в конденсированной фазе; m_f , m_{ox} – массовый поток горючего, окислителя; ρ_p – плотность топлива; α_{ox} , α_f , α_{Al} – массовая доля окислителя, связующего и алюминия соответственно; v_{ox} , v_f , v_{Al} – объемная доля окислителя, связующего и алюминия соответственно; ρ_{ox} , ρ_f , ρ_{Al} – плотность перхлората аммония, связки и алюминия соответственно; Q_{gp} – теплота разложения окислителя в газовой фазе; Q_l – скрытая теплота разложения окислителя; Q_{sr} – теплота, выделяемая при реакции на поверхности; H_p – тепловой эффект эндотермической реакции пиролиза; H_{Al} – теплоемкость алюминия; $v_f m_f$ – массовый поток связки; $m_f = (\rho_f + \rho_{Al}) A_f \exp(E_f / RT_s)$; $v_{ox} m_{ox}$ – массовый поток окислителя; $m_{ox} = \rho_p V_k (\alpha_{ox} / v_{ox})$. Индексом 1 обозначены параметры конденсированной фазы, 2 – параметры газовой фазы, индексом i указан номер фракции частиц, 3 – параметры конденсированной фазы продуктов горения.

В системе уравнений (1)–(10) уравнения (1), (3) – уравнения энергии для газовой фазы и частиц, (2) – уравнение для глубины выгорания горючего в газовой фазе, (4) – уравнение сохранения массы газовой фазы, (5) – уравнение сохранения массы частиц, (6) – уравнение движения частиц, (7) – уравнение для числа частиц, (8) – уравнение состояния идеального газа, (9) – уравнение для определения линейной скорости горения, (10) – уравнение суммарного теплового эффекта к-фазы.

Координата $x=0$ соответствует поверхности горения, T_s – температура поверхности горения.

$$T_s = T_2|_{x=0}. \quad (11)$$

На границе $x=0$ граничные условия выражают законы сохранения массы и энергии:

$$\lambda_2 \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \rho_1 V_k (c_2 T_2|_{x=0} - Q_s - c_1 T_{1,0}), \quad \rho_1 V_k = \rho_2 u|_{x=0},$$

$$\rho_1 V_k Y = D_2 \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{x=0} + \rho_2 u Y|_{x=0},$$

$$T_{3,i}|_{x=0} = T_2|_{x=0}, \quad \rho_{3,i} V_k = \rho_{3,i} w_i|_{x=0}, \quad \rho_2|_{x=0} = \frac{P}{RT_2|_{x=0}}, \quad P = \text{const},$$

$$n_i|_{x=0} = \frac{\rho_{3,i}|_{x=0}}{(4/3)\pi r_{Al,0,i}^3 \rho_{Al}}. \quad (12)$$

На границе $x = \infty$ ставятся граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0, \quad \left. \frac{\partial Y}{\partial x} \right|_{x=\infty} = 0. \quad (13)$$

Начальные условия:

$$T_2(x, 0) = T_{ign}, \quad T_{3,i}(x, 0) = T_{ign}, \quad Y(x, 0) = 0, \quad \rho_2(x, 0) = \frac{P}{RT_2(x, 0)},$$

$$\rho_{3,i}(x, 0) = 0, \quad w_i(x, 0) = 0, \quad n_i(x, 0) = 0. \quad (14)$$

В формуле (6) сила взаимодействия частиц алюминия с газом вычисляется по формуле

$$\tau_{ir,i} = \frac{F_{ir,i}}{4/3 \pi r_{k,i}^3 \rho_{Al}}, \quad F_{ir,i} = C_{R,i} S_{m,i} \frac{\rho_2 (w_i - u) |u - w_i|}{2},$$

$$C_{R,i} = \frac{24}{\text{Re}_i} (1 + 0,15 \text{Re}_i^{0,682}), \quad \text{Re}_i = \frac{2\rho_2 r_{k,i} |u - w_i|}{\eta}. \quad (15)$$

Коэффициент теплоотдачи определяется по формуле [7]:

$$\alpha_i = \frac{Nu_i \lambda_2}{2r_{k,i}}, \quad Nu_i = 2 + \sqrt{Nu_{l,i}^2 + Nu_{t,i}^2}, \quad \text{где } Nu_{l,i} = 0,664 \text{Re}_i^{0,5}, \quad Nu_{t,i} = 0,037 \text{Re}_i^{0,8}, \quad (16)$$

$$G_i = \frac{3\mu_O}{2\mu_{Al}} n_i \rho_{Al} 4\pi r_{Al,i}^2 k_{Al} \frac{a^{0,9}}{\sqrt{r_{Al,i}}}, \quad k_{Al} = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{1,5}/\text{с}, \quad (17)$$

$$r_{Al,i} = \left[\left(\frac{\mu_{Al} + 3/2 \mu_O}{\mu_{Al}} r_{Al,0,i}^3 - \frac{\rho_{3,i}}{(4/3)\pi n_i \rho_{Al}} \right) \frac{2\mu_{Al}}{3\mu_O} \right]^{1/3},$$

$$r_{k,i} = \left[r_{Al,i}^3 + \frac{\mu_{Al} + 3/2 \mu_O}{\mu_{Al}} (r_{Al,0,i}^3 - r_{Al,i}^3) \right]^{1/3}. \quad (18)$$

С учетом расчета коэффициента избытка окислителя a , который для данного состава составляет величину, равную 0,5, и данных [5] о реакционной активности частиц алюминия в среде окислителя делается предположение о том, что реакция выгорания горючего в реакции с окислителем в газовой фазе прекращается сразу после начала реакции горения любой из фракций алюминия.

В работе [6] показано, что при горении гетерогенной конденсированной системы на основе перхлората аммония с добавлением частиц алюминия марки АСД-4 18% по массе на поверхности горения образуются агломераты частиц алюминия. По данным [6], при давлении $P = 45$ атм диапазон размеров агломератов варьируется в интервале 0,5–500 мкм, однако авторы разделяют диапазон агломератов на «крупные» и «мелкие». Их среднемассовые радиусы составляют 65 и 10 мкм соответственно, а их соотношение масс 15:85. Соответствующая данному составу измеренная скорость горения составила величину $V_k = 15–17$ мм/с.

Не вдаваясь в подробности причин и механизмов образования агломератов на поверхности горения металлизированных смесевых составов, интерес представляет изучение вопроса влияния горения агломератов на стационарную скорость горения. Для этого в математической постановке задачи вводится учет полифракционности частиц алюминия в газовой фазе. Данные по среднемассовым размерам фракций берутся из экспериментальных данных [6]. Варьируя процентные соотношения фракций, рассчитывается скорость горения при давлении $P=45$ атм по модели (1)–(18).

Зависимость скорости горения смесевого твердого топлива на основе перхлората аммония от массовых соотношений «мелких» и «крупных» частиц алюминия в его составе при давлении $P=45$ атм

$m_s : m_b$	100:0	85:15	75:25	50:50	25:75	15:85	0:100
V_k , мм/с	23,79	21,91	21,33	19,64	17,46	13,13	11,90

В таблице представлены зависимости скорости горения СТТ на основе ПХА с добавлением частиц алюминия при фиксированном давлении $P=45$ атм в зависимости от массового соотношения «мелких» и «крупных» фракций. Видно, что расчет находится в хорошем согласии с экспериментом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания № 10.1329.2014/К.

Литература

1. Hermance C.E. A model of composite propellant combustion including surface heterogeneity and heat generation // AIAA Journal. 1966. Vol. 4, № 9. P. 1629.
2. Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозийного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 122 с.
3. Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Коротков А.И. О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 3. С. 323–329.
4. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическое моделирование горения смесевых составов, содержащих мелкодисперсный алюминий // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56, № 9/3. С. 196–199.
5. Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С. Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных газовых средах и составе гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1972. № 2. С. 213–236.

6. Готов О.Г., Ягодников Д.А., Воробьев В.С. и др. Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесового твердого топлива. II. Экспериментальные исследования агломерации // Физика горения и взрыва. 2007. № 3. С. 83–97.

7. Справочник по теплообменникам: в 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1987. 561 с.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ СКОРОСТЕЙ ГОРЕНИЯ ПОРОХА Н ПРИ МЕНЯЮЩЕМСЯ ДАВЛЕНИИ

В.А. Порязов, А.Ю. Крайнов

Представлена физико-математическая модель нестационарного горения пороха Н. В модели учитываются химические реакции в конденсированной и газовой фазах. На поверхности горения ставятся граничные условия четвертого рода (условия сопряжения). Представлены результаты расчета нестационарной скорости горения пороха Н. Проведено сравнение скорости горения при меняющемся давлении при решении нестационарной задачи горения и значений скорости, полученных в квазистационарной постановке, путем решения задачи до установления.

COMPARISON ACCOUNTING STATIONARY And NESTACIONARNYH VELOCITIES of the COMBUSTION of the GUNPOWDER N UNDER CHANGING PRESSURE

V.A. Poryazov, A.YU. Kraynov

Physico-mathematical model нестационарного combustions of the gunpowder N. will Presented In models учитываются the chemical reactions in condensed and in gas phase. On surfaces of the combustion are put border conditions of the fourth sort (the condition of the interfacing). The Presented results of the calculation нестационарной soon-cmu combustions of the gunpowder N. is Organized comparison to velocities of the combustion under changing pressure at decision carry;sustain;incur-ционарной of the problem of the combustion and importances of the velocity, got in квазистационарной to production, by decisions of the problem before determination.

Впервые проблема устойчивости горения при изменении давления была сформулирована в 1942 г. в ИФХ АН СССР. Теория утверждает, что скорость горения зависит не только от мгновенного значения давления окружающей среды, но и от скорости его изменения. Это утверждение распространяется не только на пороха, но и на смесевые составы [1]. Проблема устойчивости горения твердого топлива рассмотрена в работах [2–5].

Модель нестационарного горения пороха Н строится на основе модели, представленной в [6]. Рассматриваются одномерные нестационарные процессы при горении пороха. Предполагается, что в твердом веществе идут химические реакции, продуктами которых является газ, содержащий летучие горючие компоненты. Газообразные продукты разложения появляются на последней стадии реакции по достижении глубины превращения 0,99. Летучие горючие компоненты реагируют в газовой фазе до конечных продуктов. Предполагается, что теплофизические характеристики твердой фазы (плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) являются постоянными величинами. Теплоемкость газовой фазы не зависит от температуры и по величине равна удельной теплоемкости твердого вещества, число Льюиса газовой фазы равно единице, коэффициент диффузии не зависит от температуры, молекулярная масса газовой фазы принимается постоянной величиной, параметры состояния газа подчиняются уравнению состояния идеального газа. В твердом веществе пороха и в газовой фазе протекают химические реакции первого порядка, скорость которых зависит от температуры по закону Аррениуса. Давление газа над поверхностью горения не зависит от координаты, но может зависеть от времени.