

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИСПЕРСНОСТИ И СОДЕРЖАНИЯ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ

АРХИПОВ В.А., *КОРОТКИХ А.Г., ГОЛЬДИН В.Д.

Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики Томского государственного университета, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

АННОТАЦИЯ. Представлены физико-математическая модель и результаты численного расчета горения модельной конденсированной системы, содержащей порошок алюминия, позволяющая оценить влияние дисперсности и содержания порошка алюминия на скорость горения гетерогенных конденсированных систем. В рамках предлагаемой модели рассматривается горение гетерогенной конденсированной системы с ведущей стадией в газовой фазе и диффузионным механизмом горения частиц алюминия в зоне газофазных реакций. Проведены серия расчетов скорости горения для модельной конденсированной системы и сравнительный анализ с экспериментальными данными.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гетерогенная конденсированная система, дисперсность порошка, содержание алюминия, скорость горения.

ВВЕДЕНИЕ

В современных энергоустановках в качестве перспективных энергетических добавок в гетерогенных конденсированных системах (ГКС) могут быть использованы порошки металлов с целью повышения температуры горения и соответственно скорости горения, удельного импульса тяги двигателя. Применение металлических порошков в качестве энергетических добавок ГКС основано на окислении в процессе горения конденсированных систем с выделением большого количества тепла и газообразных продуктов сгорания. В настоящее время порошок алюминия является наиболее доступным и эффективным металлическим горючим, используемым в современных ГКС.

Результаты проведенных экспериментальных исследований [1 - 3] показали, что составы ГКС на основе разных типов полимерных горючих-связующих и окислителей при введении ультрадисперсного порошка (УДП) алюминия Alex, полученного методом электрического взрыва проводников (ЭВП) [4], имеют более высокую скорость горения (1,3 – 15,5 мм/с) в диапазоне давлений 0,1 – 8,0 МПа, чем аналогичные составы с микронным порошком алюминием (1,1 – 5,4 мм/с). Увеличение скорости горения ГКС может быть обусловлено целым рядом факторов, связанных с особенностями горения УДП металлов. В работе [5], в частности, предложена гипотеза о выделении в волне горения УДП алюминия Alex «запасенной энергии», которой обладает УДП металла, полученный методом ЭВП. Увеличение скорости горения ГКС может быть связано с повышением химической активности УДП алюминия Alex вследствие уменьшения размера частиц или увеличения его удельной поверхности (от 0,51 м²/г для микронного порошка алюминия АСД-4 до 13,9 м²/г для УДП алюминия Alex), уменьшения толщины и структуры оксидного слоя покрывающего частицу алюминия. Анализ влияния дисперсности порошка алюминия на процессы зажигания ГКС [6, 7] показал, что ведущая роль в процессах воспламенения и горения принадлежит металлическому горючему.

Обзор и анализ литературы показал, что в настоящее время существуют аналитические физико-математические модели горения гомогенной конденсированной системы, модели горения отдельных частиц алюминия в газовом потоке. Так, например, в работах [8 – 13]

сформулированы приближенные аналитические модели горения конденсированных систем, в которых окислитель газифицируется, а полимерное горючее-связующее находится в конденсированной фазе системы. Подробный обзор и анализ этих моделей приводится в работах [14, 15]. Детерминированные математические модели [14, 16, 17] горения гетерогенных конденсированных систем включают десятки теплофизических, диффузионных и кинетических констант, по которым отсутствуют достоверные данные, и не позволяют получить количественные оценки влияния дисперсности порошков алюминия на характеристики горения ГКС.

В настоящей работе предложена физико-математическая модель процесса горения частиц алюминия в составе ГКС, позволяющая получить количественные оценки влияния основных характеристик порошков (дисперсности и содержания в составе конденсированной системы) на стационарную скорость горения. В отличие от известных работ по оценке этих эффектов предложена более детализированная модель горения частиц алюминия, а также проведена серия расчетов для модельной конденсированной системы, содержащей порошок алюминия, и ее сравнительный анализ с экспериментальными данными.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При многостадийном процессе горения ГКС, как правило, превалирующую роль играет одна ведущая стадия химических реакций, которая определяет наблюдающуюся в экспериментальных исследованиях скорость стационарного горения. Остальные (подчиненные) стадии подстраиваются под скорость химических реакций за счет теплоотдачи от ведущей стадии. В рамках предлагаемой модели рассматривается горение ГКС с ведущей стадией в газовой фазе и диффузионным механизмом горения частиц порошка алюминия в зоне газозных реакций (рис. 1). Основное содержание модели основано на модели горения Беляева–Зельдовича для гомогенных конденсированных систем.

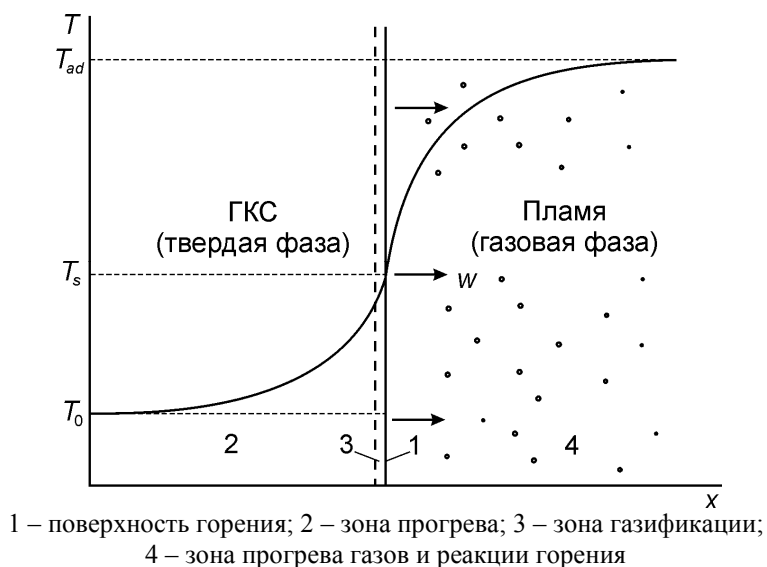


Рис. 1. Распределение температуры в зонах прогрева и горения ГКС

Для проведения аналитической оценки влияния дисперсности и содержания порошка алюминия на линейную скорость горения рассмотрим ГКС, содержащую порошок алюминия. Предположим по аналогии с моделью горения летучих конденсированных систем Беляева–Зельдовича [18, 19], что ведущая стадия горения находится в газовой фазе, а вылетающие с поверхности конденсированной фазы частицы алюминия горят в диффузионном режиме. При этом объемная скорость выделения тепла, которая согласно модели Зельдовича определяет скорость горения ГКС, включает тепловыделение $Q_1(T)$ за счет горения летучих компонентов в газовой фазе и тепловыделение $Q_2(T)$ за счет гетерогенного горения частиц алюминия.

При разработке физико-математической модели горения ГКС, содержащей порошок алюминия, приняты следующие основные допущения:

1. Ведущая стадия горения ГКС находится в газовой фазе.
2. Горение частиц порошка алюминия происходит в диффузионном режиме.
3. Зона горения квазигомогенная и одномерная.
4. Линейная скорость горения ГКС определяется градиентом температуры в зоне горения.
5. Частицы порошка алюминия представляют собой сплошные сферы.
6. Частицы порошка алюминия монодисперсны.
7. Частицы порошка алюминия движутся равновесно с газовой фазой без динамического отставания.

Скорость горения безметалльной ГКС

В соответствии с теорией Зельдовича [18] линейная скорость горения безметалльной ГКС определяется градиентом температуры на поверхности горения со стороны газовой фазы

$$\frac{dT}{dx} = \sqrt{\frac{2}{\lambda} \int_{T_s}^{T_{ad}} Q_1(T) dT}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности газа; T_s – температура поверхности горения ГКС; $Q_1(T)$ – тепловыделение (объемная скорость выделения тепла) за счет горения летучих компонентов ГКС в газовой фазе; T_{ad} – максимальная температура горения в газовой фазе безметалльной системы, которая определяется формулой

$$T_{ad} = T_s + q_0 / c, \quad (2)$$

где q_0 – теплота газофазной реакции горения на единицу массы ГКС; c – удельная теплоемкость газов.

Для реакции горения безметалльной ГКС все тепло генерируемое реакцией окисления должно отводиться теплопроводностью в область более низких температур (в зону прогрева ГКС)

$$\lambda \frac{dT}{dx} = \rho_{pr} u_0 q_0, \quad (3)$$

где ρ_{pr} – плотность ГКС; u_0 – линейная скорость горения безметалльной ГКС.

Подставляя в (3) выражение для градиента температуры (1) получаем выражение для скорости горения безметалльной ГКС за счет гомогенной реакции:

$$u_0 = \frac{1}{\rho_{pr} q_0} \sqrt{2\lambda \int_{T_s}^{T_{ad}} Q_1(T) dT},$$

где $Q_1(T) = q_0 (\rho m_{ox})^{2\nu} k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ – объемная скорость выделения тепла за счет реакции горения безметалльной ГКС [16]; ρ – плотность газа; m_{ox} – массовая доля окислителя у поверхности горения; k_0 , E – предэкспоненциальный множитель и энергия активации реакции горения ГКС; R – универсальная газовая постоянная; 2ν – порядок реакции.

Используя разложение Франк-Каменецкого для экспоненты [20] и учитывая, что основной вклад в интеграл дает область температур близких к температуре горения T_{ad} , получим выражение для расчета скорости горения безметалльной ГКС:

$$u_0 = \frac{1}{\rho_{pr} q_0} \sqrt{\frac{2\lambda R T_{ad}^2}{E} q_0 (\rho m_{ox})^{2\nu} k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{R T_{ad}}\right)}. \quad (4)$$

Влияние добавки порошка алюминия на тепловыделение в газофазной зоне реакции ГКС

При введении в состав ГКС в качестве металлического горючего (порошка алюминия) появляется тепловыделение за счет гетерогенной реакции горения на поверхности частиц. Как сказано выше в допущениях, гетерогенная реакция горения частиц порошка алюминия идет в диффузионном режиме, т. е. ее скорость лимитируется скоростью подвода окислителя к поверхности частицы. По аналогии с (3) можно записать

$$\lambda \frac{dT}{dx} = \rho_{pr} u (m_{Al} q_p + (1 - m_{Al}) q_0), \quad (5)$$

где u – линейная скорость горения металлизированной ГКС; m_{Al} – массовая доля порошка алюминия на поверхности горения; q_p – тепловой эффект реакции окисления на единицу массы порошка алюминия.

В предположении того, что гомогенная и гетерогенная реакции горения конденсированной системы и частиц алюминия протекают в газофазной зоне, в соответствии с [10] можно записать:

$$u \sim \sqrt{Q_1(T) + Q_2(T)},$$

где $Q_2(T)$ – объемная скорость выделения тепла за счет гетерогенной реакции горения на поверхности частиц алюминия.

Тогда из выражения (5) получим формулу для расчета линейной скорости горения металлизированной ГКС

$$u = \frac{1}{\rho_{pr} (m_{Al} q_p + (1 - m_{Al}) q_0)} \sqrt{2\lambda \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_1(T) dT + 2\lambda \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_2(T) dT}, \quad (6)$$

где T_{ad1} – максимальная температура в зоне горения металлизированной ГКС, которая определяется формулой

$$T_{ad1} = T_s + \left(\frac{c_p}{c} - 1 \right) m_{Al} T_s + \frac{q_0 (1 - m_{Al}) + (q_p - q_{ev}) m_{Al}}{c}, \quad (7)$$

где c_p – удельная теплоемкость алюминия; q_{ev} – удельная теплота испарения алюминия.

При $m_{Al} = 0$ формула (7) сводится к выражению (2).

Расчет выделения тепла за счет гетерогенного горения частиц алюминия

Объемная скорость тепловыделения $Q_2(T)$ за счет горения монодисперсного порошка алюминия с диаметром частиц D равна

$$Q_2(T) = \rho_p u_p \pi D^2 C_n q_p, \quad (8)$$

где u_p – линейная скорость горения частицы алюминия; ρ_p – плотность алюминия; C_n – счетная концентрация частиц алюминия в газовом потоке, которая находится из условия

$$C_n w_p = C_{n0} u, \quad (9)$$

где C_{n0} – счетная концентрация частиц алюминия в составе ГКС; w_p – скорость оттока частиц алюминия (равная скорости газа w для частиц микронных размеров).

Величина C_{n0} связана с массовой долей алюминия в составе ГКС соотношением

$$C_{n0} = \frac{6 m_{Al} \rho_{pr}}{\rho_p \pi D^3}. \quad (10)$$

С учетом формул (9), (10) выражение для объемной скорости выделения тепла за счет гетерогенного горения частиц алюминия (8) примет вид:

$$Q_2(T) = \frac{6 u_p q_p m_{Al} \rho_{pr}}{D} \cdot \frac{u}{w}. \quad (11)$$

Подставляя в уравнение (11) выражение для линейной скорости горения частицы алюминия

$$u_p = \frac{1}{2} \left| \frac{dD}{dt} \right| = \frac{\text{Nu} \cdot Q_p(T, T_b)}{\rho_p D}, \quad (12)$$

получим:

$$Q_2(T) = \frac{6q_p m_{\text{Al}} \rho_{pr}}{\rho_p D^2} \cdot \frac{u}{w} \cdot \text{Nu} \cdot Q_p(T, T_b) \cdot \max[0, \text{sgn}(T_s - T_b)], \quad (13)$$

где $Q_p(T, T_b)$ – тепловыделение при испарении частиц порошка алюминия; $\text{Nu} = \alpha D / \lambda$ – число Нуссельта; α – коэффициент теплоотдачи от газового потока к поверхности частицы алюминия; T_b – температура кипения алюминия (температура поверхности частицы).

При разном содержании металлического горючего в составе ГКС выполняется соотношение

$$u \rho_{pr} = w \rho_m,$$

где ρ_m – плотность смеси газа и частиц алюминия; w – скорость оттока газов от поверхности конденсированной фазы.

Поскольку объемная доля частиц порошка алюминия в газовой фазе мала по сравнению с объемной долей продуктов разложения, то плотность газа с учетом частиц алюминия можно определить соотношением

$$\rho_m = \rho + C_n m_p,$$

где m_p – масса частицы.

С учетом последнего равенства можно записать

$$\frac{u}{w} = \frac{\rho}{\rho_{pr}(1 - m_{\text{Al}})}.$$

Тогда из уравнения (13) следует

$$Q_2(T) = \frac{6q_p m_{\text{Al}} \rho}{\rho_p D^2 (1 - m_{\text{Al}})} \cdot \text{Nu} \cdot Q_p(T, T_b) \cdot \max[0, \text{sgn}(T_s - T_b)].$$

С учетом уравнения состояния выражение для $Q_2(T)$ можно представить в виде

$$Q_2(T) = A \frac{P}{D^2},$$

где $A = \frac{6q_p m_{\text{Al}}}{\rho_p R_g T (1 - m_{\text{Al}})} \cdot \text{Nu} \cdot Q_p(T, T_b) \cdot \max[0, \text{sgn}(T_s - T_b)]$, R_g – газовая постоянная продуктов разложения.

Модель горения частицы алюминия

В соответствии с предложенной физико-математической моделью горения металлизированной ГКС необходимым этапом является расчет динамики нагрева и диффузионного горения частиц алюминия, поступающих в газовую фазу с поверхности горения образца.

Представим модель горения частицы алюминия в газовой среде, которая описывается следующей системой уравнений.

Уравнение теплового баланса частицы алюминия:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = -S \left[\alpha (T_p - T) + \varepsilon_{\text{ox}} \sigma (T_p^4 - T^4) \right] + \frac{S (q_p - q_{\text{ev}}) \rho_{\text{ox}}}{\nu_{23}} \frac{dh}{dt}, \quad (14)$$

где T_p – температура частицы; S – площадь поверхности частицы; T – температура газовой фазы; ρ_{ox} , ε_{ox} – плотность и степень черноты поверхности оксида алюминия; σ – постоянная

Стефана-Больцмана; h – толщина оксидной пленки; t – время; $v_{23} = \frac{M_{ox}}{2M_{Al}}$ – массовый стехиометрический коэффициент, равный отношению молекулярных масс оксида и чистого алюминия.

Уравнение кинетики окисления частицы алюминия [19, 21]

$$\frac{dh}{dt} = \frac{zm_{ox}'}{h} \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right) \cdot \max\left[0, \operatorname{sgn}(T_p - T_{ign})\right], \quad (15)$$

где z , E – предэкспоненциальный множитель и энергия активации реакции горения частицы алюминия; m_{ox}' – массовая доля окислителя на поверхности частицы алюминия; T_{ign} – температура воспламенения частицы алюминия.

Уравнения (14), (15) определяют период индукции воспламенения частиц алюминия. Согласно данным [19] процесс горения частиц алюминия начинается при условии $T_p > T_{ign}$, когда температура воспламенения частиц алюминия близка к температуре плавления оксида алюминия $T_{ign} = 2323$ К.

Численное интегрирование системы (14)–(15) проводилось по схеме Эйлера с пересчетом и автоматическим подбором шага по времени. Сингулярность уравнения (15) исключалась заданием начального значения толщины оксидной пленки в соответствии с заданием массовой доли неокисленного алюминия α_s и диаметра частицы:

$$h = \frac{D_0}{2} \cdot \left(1 - 3\sqrt{\frac{\alpha_s}{(1 - \alpha_s) \cdot v_{32} + \alpha_s}}\right).$$

Для выявления функции тепловыделения $Q_p(T, T_b)$ за счет испарения частиц алюминия анализировались рассчитанные зависимости температуры и объема алюминиевого ядра, отнесенного к начальному объему частицы, в зависимости от времени и расстояния до поверхности горения образца ГКС.

Для этого использовали уравнение баланса массы для испаряющейся (и горящей по диффузионному механизму) частицы алюминия

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\rho_p \pi D^3}{6} \right) = -G, \quad (16)$$

где G – массовая скорость горения частицы алюминия (скорость массопереноса металла в радиальном направлении).

Зависимость для изменения диаметра частицы алюминия во времени, которая следует из уравнения (16), имеет вид

$$\frac{dD}{dt} = -\frac{2G}{\rho_p \pi D^2}.$$

В соответствии с теорией диффузионного горения капли Варшавского-Сполдинга [16] в рамках модели приведенной пленки выражение для массовой скорости горения частицы металла G можно представить в виде:

$$G = \pi D \operatorname{Nu} Q_p(T, T_b),$$

тепловыделение при испарении частиц порошка алюминия:

$$Q_p(T, T_b) = \lambda \int_{T_b}^T \frac{dT}{q_{ev} + c_{p,v}(T - T_b)} = \frac{\lambda}{c_{p,v}} \ln \frac{q_{ev}/c_{p,v} + (T - T_b)}{q_{ev}/c_{p,v}},$$

где $c_{p,v}$ – удельная теплоемкость паров алюминия.

Зависимость для изменения диаметра частиц от времени в виде закона Срезневского, полученная после интегрирования уравнения (12) при $\operatorname{Nu} = \operatorname{const}$

$$D^2 = D_0^2 - \frac{4}{\rho_p} \text{Nu} Q_p(T, T_b) t, \quad (17)$$

где D_0 – начальный диаметр частицы.

Для конкретизации входящей в уравнение (17) зависимости $Q_p(T, T_b)$ при горении частицы алюминия возможно использование расчетных методик, например [16], однако ввиду схематизации процесса и неопределенности ряда коэффициентов, предпочтительнее использовать метод аппроксимации опытных данных по времени сгорания частиц алюминия в неподвижной среде ($\text{Nu} = 2$). При этом в соответствии с уравнением (17) время сгорания частицы с начальным диаметром D_0 равно

$$t_0 = \frac{\rho_p D_0^2}{8 Q_p(T, T_b)}. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует формула для определения $Q_p(T, T_b)$:

$$Q_p(T, T_b) = \frac{\rho_p D_0^2}{8 t_0}.$$

Из анализа данных по времени сгорания частиц алюминия в исследуемом диапазоне D_0 можно определить $Q_p(T, T_b)$. Подставляя значение $Q_p(T, T_b)$ в выражение (12), получим уравнение для расчета линейной скорости горения частицы алюминия

$$\frac{dD}{dt} = - \frac{4 Q_p(T, T_b)}{\rho_p D} \text{Nu} \cdot \max[0, \text{sgn}(T_p - T_{\text{ign}})].$$

В качестве зависимости для числа Нуссельта примем формулу [19]

$$\text{Nu} = 2 + 0,16 \text{Re}^{2/3},$$

где Re – число Рейнольдса.

В рамках рассмотренной модели диффузионного горения частицы алюминия в газовом потоке можно провести оценку максимального размера частиц алюминия, ниже которого линейная скорость горения металлизированной ГКС будет существенно возрастать. При введении достаточно крупных частиц порошка алюминия (с небольшими значениями массовой доли m_{Al}) в состав ГКС, их влияние на увеличение скорости горения незначительно. Действительно, крупные частицы могут воспламеняться и гореть далеко за фронтом горения продуктов газификации горючего-связующего и окислителя, и поэтому тепловыделение при их сгорании $Q_2(T)$ не может существенно повысить температуру в зоне реакции. С другой стороны, тепловые потери на прогрев и испарение таких частиц в зоне реакции также невелики. Скорость горения в этом случае будет определяться, в основном, тепловыделением за счет продуктов газификации окислителя и полимерного горючего-связующего $Q_1(T)$.

Если средний размер частиц порошка алюминия будет меньше некоторого критического значения $D \leq D^*$, то частицы будут воспламеняться и полностью сгорать в зоне между поверхностью горения ГКС и фронтом горения продуктов газификации. Порядок D^* можно оценить формулой [11]

$$D^* \cong \frac{a}{w} \sqrt{\frac{8}{\rho_p} Q_p(T, T_b) \ln \frac{T_f - T^*}{T_{\text{ign}} - T^*}}, \quad (19)$$

где a – коэффициент температуропроводности газовой фазы; T_f – температура на фронте горения; T^* – масштабная температура, при которой пары продуктов разложения ГКС имели бы энтальпию, равную энтальпии жидкой ГКС при T_0 , определяемая соотношением

$$T^* = T_s - \frac{c_{pr}(T_s - T_0) + q_0}{c},$$

c_{pr} – средняя удельная теплоемкость ГКС; T_0 – начальная температура ГКС.

Приведенные соотношения получены в предположении квазигомогенности зоны горения частиц металла в газовом потоке. В работе [14] проведена оценка размеров частиц порошка алюминия в ГКС, необходимых для обоснования гомогенности зоны горения. Диаметр частиц алюминия D , необходимый для квазигомогенности зоны горения, оценивается по формуле

$$D < \frac{\rho}{\rho_p} \cdot \frac{m_{Al}}{1 - m_{Al}} \cdot \frac{\lambda}{c\rho_{pr}u}. \quad (20)$$

Для типичных значений параметров ГКС входящих в (20), условие квазигомогенности зоны горения выполняется для частиц алюминия средним диаметром $D < 0,1$ мкм, т. е. для наноразмерного порошка алюминия.

Скорость горения металлизированной ГКС

Скорость горения (6) металлизированной ГКС представим в виде выражения

$$u = \frac{1}{\rho_{pr} (m_{Al}q_p + (1 - m_{Al})q_0)} \sqrt{2\lambda(J_1 + J_2)}, \quad (21)$$

где $J_1 = \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_1(T) dT$, $J_2 = \int_{T_s}^{T_{ad1}} Q_2(T) dT$ – интегралы функций тепловыделения за счет горения безметалльной ГКС и порошка алюминия.

Для проведения численного расчета интегралы функций тепловыделения в газофазной зоне горения безметалльной ГКС и монодисперсного порошка алюминия в соответствии с математической теорией горения [18] преобразуем, учитывая, что $E/(RT_{ad}) \gg 1$

$$J_1 \approx q_0 k_0 \left(\frac{p_{atm} m_{ox}}{R_g} \frac{R}{E} \right)^{2v} \frac{RT_{ad1}^2}{E} \exp \left(-\frac{E}{RT_{ad1}} \right) \left(\frac{p}{p_{atm}} \right)^{2v},$$

$$J_2 = \frac{6q_p m_{Al} p}{\rho_p R_g D^2 (1 - m_{Al})} \text{Nu} \int_{T_b}^{T_{ad1}} Q_p(T, T_b) \frac{dT}{T} = \frac{6q_p m_{Al} p \lambda}{\rho_p R_g D^2 (1 - m_{Al}) c_{p,v}} \text{Nu} \cdot I,$$

где $p_{atm} = 0,1$ МПа – давление в газофазной зоне реакции;

$$I = \int_0^a \frac{\ln(1 + \xi)}{\xi + b} d\xi \approx \int_0^a \frac{\xi - \frac{1}{2}\xi^2}{\xi + b} d\xi = \left(1 + \frac{b}{2}\right) \left[a - b \ln \left(1 + \frac{a}{b}\right) \right] - \frac{a^2}{4}; \quad a = \frac{c_{p,v}}{q_{ev}} (T_{ad} - T_b); \quad b = \frac{c_{p,v}}{q_{ev}} T_b;$$

$$\xi = \frac{c_{p,v}}{q_{ev}} (T - T_b).$$

При вычислении интеграла логарифмическая функция I заменена отрезком ряда Тейлора поскольку $a \ll 1$. Тогда J_2 можно представить в виде:

$$J_2 \approx \frac{6q_p p_{atm} \lambda}{\rho_p R_g D_*^2 (1 - m_{Al}) c_{p,v}} \text{Nu} \cdot I \cdot m_{Al} \frac{p}{p_{atm}} \left(\frac{D_*}{D} \right)^2.$$

При наличии частиц порошка алюминия в составе ГКС скорость горения меняется в зависимости от содержания, среднего диаметра частиц порошка алюминия, и, кроме того, от температуры в зоне горения, которая при добавлении частиц алюминия увеличивается. Скорость горения безметалльной ГКС (при $m_{Al}=0$) при температуре горения T_{ad1} в соответствии с выражением (21) будет определяться

$$u'_0 = \frac{\sqrt{2\lambda J_1(T_{ad1})}}{\rho_{pr} q_0} \approx u_0 \frac{T_{ad1}}{T_{ad}} \exp \left[\frac{E}{2RT_{ad}} \left(1 - \frac{T_{ad}}{T_{ad1}} \right) \right].$$

С учетом этого значение K_u равного отношению скорости горения ГКС, содержащей порошок алюминия, к скорости горения безметалльной системы, и показывающего эффективность добавки металлического горючего на горение ГКС в зависимости от его дисперсности и содержания, можно представить в виде:

$$K_u = \frac{u}{u_0} = \frac{u_0'}{u_0} \frac{1}{1 + m_{Al} \left(\frac{q_p}{q_0} - 1 \right)} \sqrt{1 + \frac{J_2}{J_1}}. \quad (22)$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Описанная выше физико-математическая модель горения металлизированной ГКС была применена для расчета характеристик процесса горения модельной гомогенной конденсированной системы (пороха Н), содержащей порошок алюминия разной дисперсности.

Исходные данные

При численной реализации математической модели и проведении расчетов использовались справочные данные по теплофизическим характеристикам пороха Н, его продуктам сгорания и порошка алюминия [4, 14, 16, 19, 21], приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Теплофизические параметры модельной конденсированной системы и порошка алюминия

Обозначение	Характеристика	Значение
Порох Н, продукты сгорания		
ρ_{pr}	плотность ГКС	1600 кг/м ³
c_{pr}	удельная теплоемкость ГКС	1084 Дж/(кг·К)
q_0	удельная теплота газофазной реакции горения ГКС	2,325·10 ⁶ Дж/кг при p = 2 МПа; 2,765·10 ⁶ Дж/кг при p = 4 МПа
T_{ad}	температура горения ГКС	1923 К при p = 2 МПа; 2203 К при p = 4 МПа
E	энергия активации реакции горения в газовой фазе	1,7·10 ⁸ Дж/кмоль
R_g	газовая постоянная продуктов сгорания ГКС	300 Дж/(кг·К)
λ	коэффициент теплопроводности газообразных продуктов сгорания ГКС	0,207 Вт/(м·К)
c	удельная теплоемкость газообразных продуктов сгорания ГКС	1739 Дж/(кг·К)
v	показатель в степенном законе скорости горения	0,409
Порошок алюминия		
ρ_p	плотность алюминия	2700 кг/м ³
c_p	удельная теплоемкость алюминия	930 Дж/(кг·К)
T_{ign}	температура воспламенения алюминия	2323 К
T_b	температура кипения алюминия	2792 К
q_p	тепловой эффект реакции окисления алюминия	3,1·10 ⁷ Дж/кг
q_{ev}	удельная теплота испарения алюминия	9,2·10 ⁶ Дж/кг
m_{ox}'	массовая доля окислителя вблизи поверхности частицы	0,53
$c_{p,v}$	удельная теплоемкость паров алюминия	770 Дж/(кг·К)
ε_{ox}	интегральный коэффициент излучения поверхности частицы (оксида) алюминия	0,4
α_s	массовая доля активного алюминия в порошке	0,98

Для расчета линейной скорости горения и интеграла функции тепловыделения при горении безметалльной системы использовалась экспериментальная зависимость для гомогенной конденсированной системы

$$u_0 = 1,71 \left(\frac{p}{p_{atm}} \right)^{0,409}, \quad (23)$$

где $[u_0] = \text{см/с}$, $[p] = \text{МПа}$; $p_{atm} = 0,1 \text{ МПа}$.

Температура горения металлизированной ГКС

Проведена оценка полноты сгорания частиц алюминия в газофазной зоне реакции горения ГКС при движении частиц со скоростью газовой фазы без динамического отставания. Для этого рассчитывалась скорость оттока газов от поверхности конденсированной фазы и ширина газофазной зоны реакции по формулам

$$w = \frac{u \cdot \rho_{pr}}{\rho_m}, \quad l = \frac{\lambda}{\rho_m w c} \cdot \ln \frac{T_{ad1} - T^*}{T_s - T^*}.$$

Результаты расчета представлены на рис. 2.

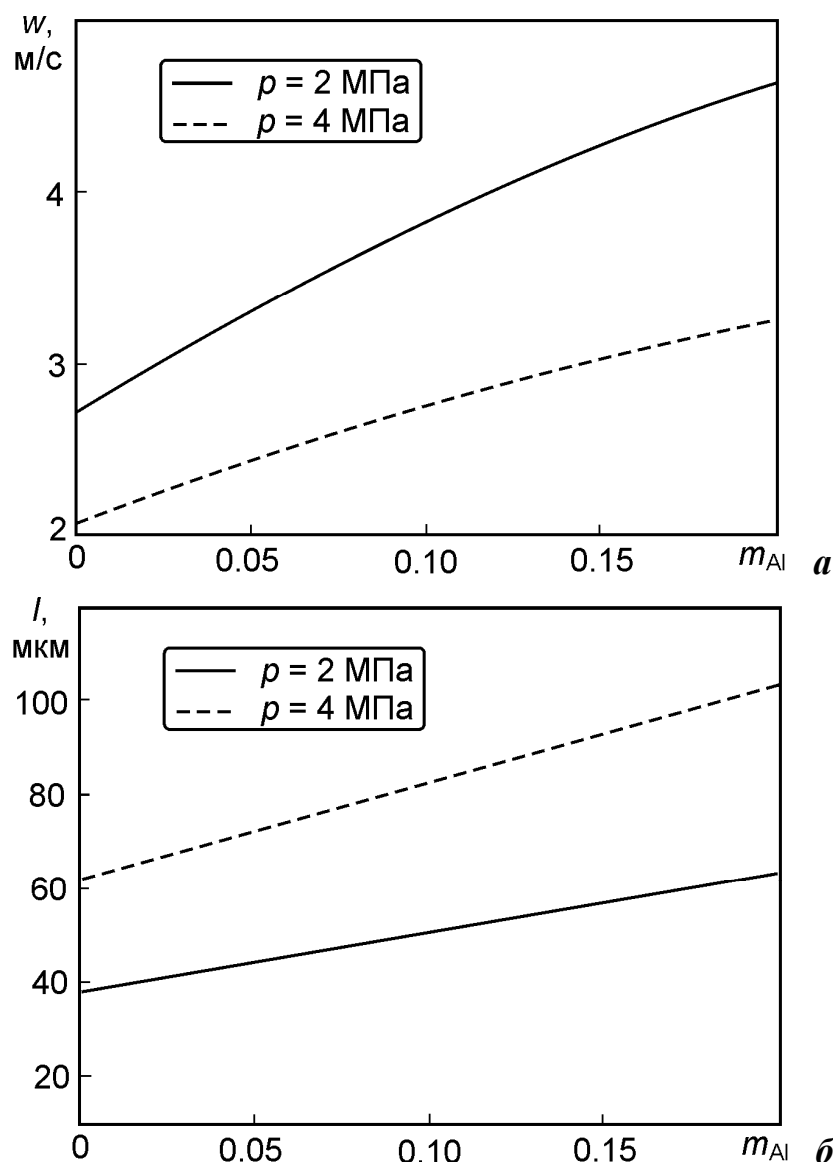


Рис. 2. Скорость оттока газов (а) и ширина газофазной зоны реакции (б) при различном содержании порошка алюминия в ГКС

Оценочный расчет полноты сгорания частиц алюминия в диффузионном режиме в потоке газа показал, что максимальный диаметр частиц должен составлять 0,44 – 0,66 мкм в зависимости от давления окружающей среды, что соответствует дисперсности УДП алюминия Alex [4]. При этом время сгорания частиц алюминия составляет 14 – 32 мкс.

Определены значения температуры горения модельной ГКС в зависимости от содержания порошка алюминия при условии, что все частицы сгорают в газофазной зоне реакции (рис. 3). При увеличении массовой доли от 0,01 до 0,20 порошка алюминия в составе ГКС максимальная температура в газофазной зоне реакции горения возрастает от 2033 до 4133 К – при давлении окружающей среды 2 МПа, от 2311 до 4360 К – при давлении окружающей среды 4 МПа при постоянном значении удельной теплоемкости газа.

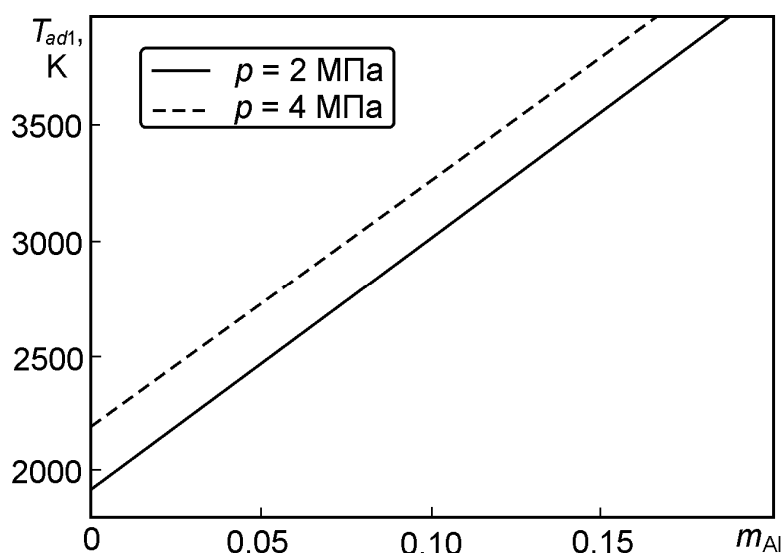


Рис. 3. Зависимость температуры горения металлизированной ГКС от содержания порошка алюминия

Скорость горения металлизированной ГКС

Определены значения линейной скорости горения ГКС, содержащей порошок алюминия. Интеграл функции тепловыделения за счет реакции горения безметалльной ГКС рассчитывался с использованием экспериментальной зависимости скорости горения от давления (23). Значения коэффициента K_u равного отношению скорости горения ГКС, содержащей порошок алюминия (при $m_{Al} = 0,05$), к скорости горения безметалльной системы представлены на рис. 4.

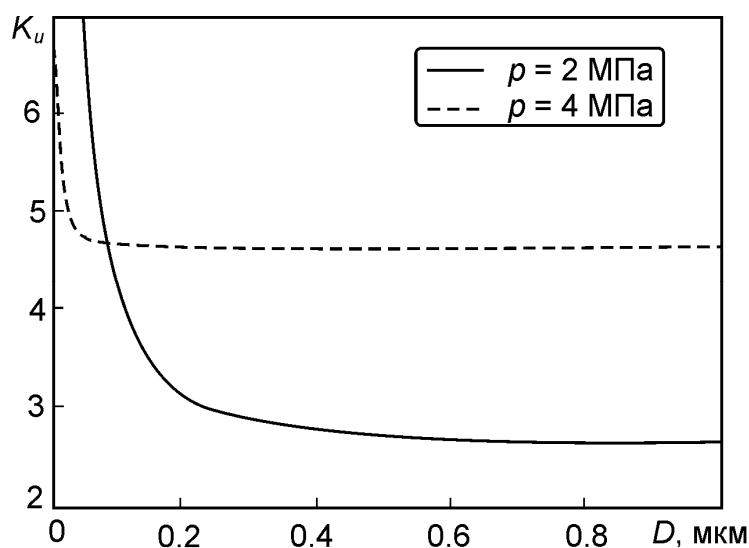


Рис. 4. Значение коэффициента K_u в зависимости от размера частиц порошка алюминия

Как следует из рис. 4, уменьшение диаметра частиц при фиксированном значении массовой доли m_{Al} порошка алюминия в составе ГКС приводит к возрастанию скорости горения. При диаметре частиц алюминия $D = 0,01$ мкм значение K_u выходит на постоянное значение при давлении окружающей среды 4 МПа, и при $D = 0,6$ мкм – $p = 2$ МПа. Кроме того при увеличении диаметра частиц алюминия величина интеграла функции тепловыделения за счет гетерогенного горения частиц J_2 убывает, в результате K_u перестает зависеть от давления.

Для сравнительного анализа расчетных результатов с экспериментальными данными [2] представим значение коэффициента K равного отношению скорости горения ГКС, содержащей УДП алюминия Alex ($D_{43} = 0,18$ мкм), к скорости горения ГКС, содержащей микроразмерный порошок алюминия АСД-4 ($D_{43} = 7,34$ мкм). Результаты расчета значения K представлены на рис. 5 и табл. 2.

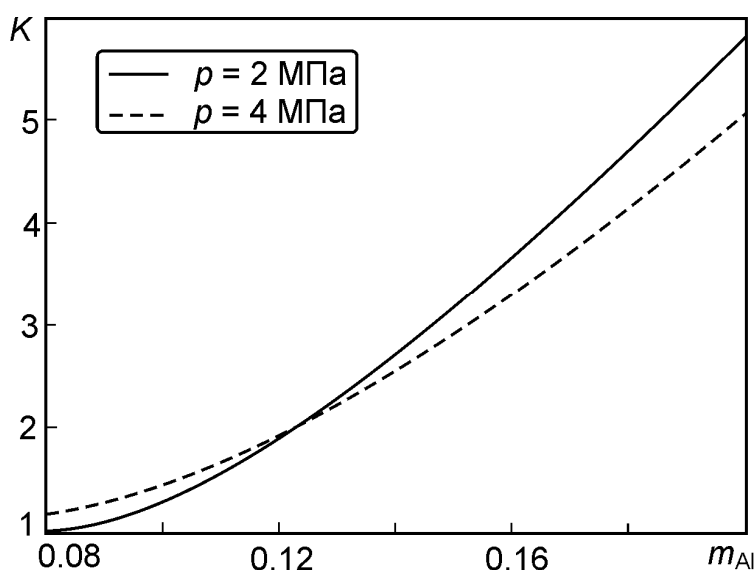


Рис. 5. Значение коэффициента K в зависимости от массовой доли порошка алюминия в составе ГКС

Таблица 2

Значения коэффициента K при разных давлениях

Массовая доля порошка алюминия в составе ГКС	Значение $K = u_{Alex}/u_{АСД-4}$			
	при $p = 2$ МПа		при $p = 4$ МПа	
	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
0,1	1,26	1,61	1,44	1,80
0,2	5,79	2,30	5,03	2,57

Анализ результатов показал, что при увеличении массовой доли порошка алюминия в составе ГКС разность расчетных и экспериментальных значений K увеличивается. Последний факт является следствием предположения, что горение летучих компонентов ГКС в газовой фазе и горение частиц алюминия происходит в пределах одного фронта пламени.

ВЫВОДЫ

На основе модели горения Беляева-Зельдовича для конденсированных систем предложена математическая модель горения гетерогенных конденсированных систем, учитывающая размер частиц и содержание порошка алюминия. В рамках данной математической модели рассматривается горение гетерогенной конденсированной системы с

ведущей стадией в газовой фазе и диффузионным механизмом горения частиц алюминия в зоне газозванных реакций.

Установлено, что основным фактором, определяющим скорость горения гетерогенной конденсированной системы, является адиабатическая температура горения в зоне газозванных реакций. Для гетерогенной конденсированной системы, содержащей порошок алюминия, повышение адиабатической температуры горения ГКС связано с высоким тепловыделением при горении частиц алюминия. При увеличении массовой доли порошка алюминия в составе ГКС температура горения и, соответственно, скорость стационарного горения увеличиваются.

При массовой доле порошка алюминия $m_{Al} \leq 0,1$ в составе конденсированной системы результаты расчета коэффициента эффективности добавки порошка алюминия на скорость горения K имеют удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными, полученными для гетерогенных конденсированных систем на основе перхлората аммония и бутилкаучука, содержащих порошки ультрадисперсного (Alex) и микроразмерного алюминия (АСД-4).

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта № 11.519.11.3004 по теме «Применение нанопорошков металлов в энергетических и керамических технологиях» выполняемой в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mench M.M., Kuo K.K., Yeb C.L., and Lu Y.C. Comparison of thermal behavior of regular and ultra-fine aluminum powders (Alex) made from plasma explosion process // *Combustion Science and Technology*. 1998. V. 135. P. 269-292.
2. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т. и др. Влияние дисперсности добавок металлов на скорость горения смесевых композиций // *Химическая физика*. 2004. Т. 23, № 9. С. 18-21.
3. Де Лука Л.Т., Галфетти Л., Северини Ф. и др. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 6. С. 80-94.
4. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Коротких А.Г. и др. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия // *Горный журнал. Спец. выпуск. Цветные металлы*. 2006. № 4. С. 58-65.
5. Ivanov G.V. and Tapper F. Activated aluminum as a stored energy source for propellants // *Challenges in Propellants and Combustion 100 Years after Nobel / Edited by K.K. Kuo et al. New York, Walligford (U.K.) : Begell house, Inc.*, 1997. P. 636-645.
6. Архипов В.А., Коротких А.Г., Кузнецов В.Т. и др. Влияние дисперсности порошков металлов на характеристики кондуктивного и лучистого зажигания смесевых композиций // *Химическая физика*. 2007. Т. 26, № 6. С. 58-67.
7. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G. The influence of aluminum powder dispersity on composite solid propellants ignitability by laser radiation // *Combustion and Flame*. 2012. V. 159. P. 409-415.
8. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М. : Наука, 1968. 255 с.
9. Новожилов Б.В. Скорость горения модельного двухкомпонентного смесевых пороха // *Доклады АН СССР*. 1970. Т. 191, № 6. С. 1400-1403.
10. Бахман Н.Н., Кондрашков Ю.А. Выражения для скорости горения при одновременном протекании гомогенной и гетерогенной реакций // *Доклады АН СССР*. 1966. Т. 168, № 4. С. 844-845.
11. Бахман Н.Н., Кондрашков Ю.А. Горение трехкомпонентных конденсированных смесей // *Журнал физической химии*. 1963. Т. 37, № 1. С. 216-219.
12. Renie J.P. and Osborn J.P. Combustion modeling of aluminized propellants // *AIAA Paper. N 79-1131. AIAA/SAE/ASME Propulsion Meeting, Las Vegas*, 1979.
13. Beckstead M.W. A model for solid propellant combustion // *Proceedings of 14th JANNAF Combustion Meeting. CPIA Publication 292*. 1977. V. 1. P. 281-306.
14. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е., Зырянов В.Я. и др. Моделирование процессов горения твердых топлив. Новосибирск : Наука, 1985. 179 с.
15. Бекстед М.В. Анализ данных по времени горения частиц алюминия // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 5. С. 55-69.
16. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л. : Энергоатомиздат, 1986. 312 с.

17. Липанов А.М., Булгаков В.К., Кодолов В.Н. Моделирование горения полимерных материалов. М. : Химия, 1990. 240 с.
18. Зельдович Я.Б. К теории горения порохов и взрывчатых веществ // Теория горения порохов и взрывчатых веществ. М. : Наука, 1982. С. 49-86.
19. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В. и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М. : Наука, 1972. 294 с.
20. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М. : Наука, 1987. 502 с.
21. Федоров А.В., Харламова Ю.В. Воспламенение частицы алюминия // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 5. С. 65-68.

ASTIMATION OF INFLUENCE DISPERSITY AND CONTENT OF ALUMINUM POWDER ON THE BURNING RATE OF HETEROGENEOUS CONDENSED SYSTEMS

Arkhipov V.A., Korotkikh A.G.*, Goldin V.D.

Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics of Tomsk State University, Tomsk, Russia

*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

SUMMARY. The physical-mathematical model and the results of numerical calculation of the combustion model of condensed system containing aluminum powder, to assess the influence of dispersity and content of aluminum powder on the burning rate of heterogeneous condensed systems are presented. The proposed model considers the combustion of heterogeneous condensed systems with the leading stage in the gas phase and the burning diffusion mechanism of aluminum powder particles in the zone of gas phase reactions. A series of calculations of the burning rate for a model condensed system and comparative analysis with experimental data are conducted.

KEYWORDS: heterogeneous condensed system, dispersity of powder, content of aluminum, burning rate.

Архипов Владимир Афанасьевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом НИИ ПММ ТГУ, тел. (3822)52-96-56, e-mail: leva@niipmm.tsu.ru

Коротких Александр Геннадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент НИ ТПУ, тел. (3822)42-08-37, e-mail: korotkikh@tpu.ru

Гольдин Виктор Данилович, старший научный сотрудник НИИ ПММ ТГУ, тел. (3822)52-96-56, e-mail: vdg@math.tsu.ru