

УДК 536.46

КАРМАННАЯ МОДЕЛЬ АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ С ТЕТРАЭДРИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКОЙ ДЛЯ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ

О. Г. Глотов^{1,2}, И. В. Сорокин¹, А. А. Черемисин¹

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск, glotov@kinetics.nsc.ru, sorokin@kinetics.nsc.ru, cheremisin@kinetics.nsc.ru

²Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск

Для оценки размера агломератов металла при горении смесового твердого топлива предложена тетраэдрическая модель структуры, согласно которой частицы окислителя располагаются в вершинах правильного тетраэдра, а внутренний объем пирамиды занят смесью горючего-связующего и металла — так называемый «карман». Представлено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета по тетраэдрической модели, модели Козна, а также с эмпирическими корреляциями Гермсена, Салиты, Бекстеда, Григорьева, Дютерка. Сравнение проведено на примере смесового топлива, содержащего перхлорат аммония, связующее и алюминий. Показано, что тетраэдрическая модель в ряде случаев лучше предсказывает диаметр агломератов, чем другие модели.

Ключевые слова: смесовое топливо, алюминий, модель агломерации, карман, размер агломерата.

DOI 10.15372/FGV2022/9258

ВВЕДЕНИЕ

Частицы алюминия, входящие в состав смесового ракетного топлива, участвуют во множестве физико-химических процессов, в конечном итоге приводящих к образованию агломератов — частиц, объединяющих в себе множество начальных частиц металла, заложенных в топливо. Вместе с тем, агломераты содержат как оксид, так и непрореагировавший металл и потому способны к дальнейшей эволюции, в частности к реагированию в потоке газообразных продуктов горения топлива. Явление агломерации дисперсного алюминия в процессе горения смесового твердого топлива можно схематично представить следующим образом [1–4]. В результате повышения температуры при прохождении волны горения частицы Al, контактирующие в объеме топливной массы, первоначально спекаются в конгломераты в местах растрескивания оксидной оболочки. Конгломераты могут выступать над поверхностью горения топлива или находиться внут-

ри каркасного слоя, удерживаясь силами адгезии. Каркасный слой состоит преимущественно из спеченных частиц алюминия и продуктов неполной газификации связующего в виде углеродистых остатков. Спеченные частицы могут образовывать «корни», простирающиеся вглубь топлива [5] и играющие важную роль для удержания частиц на поверхности горения. При определенных условиях спеченные частицы-конгломераты могут выступать с поверхности горения в газовую фазу в виде ажурных гроздей, форма которых частично наследует пространственное распределение частиц металла в объеме топлива между частицами окислителя. Когда температура конгломерата достигает точки плавления оксида алюминия, конгломерат сплавляется в сферическую каплю — агломерат в классическом понимании этого термина. Размер агломерата на этой стадии определяется особенностями структуры топлива в терминах «карманов» — геометрических объемов, обогащенных металлом и тем или иным образом ограниченных крупными частицами окислителя, нитрамина или иного неметаллического компонента топлива. При этом, однако, и конгломераты, и каплевидные агломераты могут перемещаться по поверхности топлива под действием оттекающих от поверхности газов и, продолжая удерж-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2020-781).

Доложено на 10-й Международной конференции им. В. В. Воеводского «Химия и физика элементарных химических процессов», 5–9 сентября 2022 г., Новосибирск
© Глотов О. Г., Сорокин И. В., Черемисин А. А., 2023.

живаться силами адгезии и поверхностного натяжения, способны подпитываться и расти за счет поглощения частиц металла и других агломератов. В этом случае можно говорить о реализации «межкарманного» механизма агломерации. Во всех случаях, на конгломераты и агломераты, находящиеся на поверхности топлива, действует аэродинамическая отрывающая сила оттекающих от поверхности газов. Если ее величина превышает удерживающую силу, то происходит их отрыв от поверхности горения. Таким образом, баланс отрывающей и удерживающей сил определяет размер агломератов, покидающих поверхность горения.

Знание начальных размеров агломератов и закономерностей их эволюции, в том числе динамики выгорания, необходимо для моделирования процессов в ракетном двигателе, в частности для расчета тепловыделения от горения металла, прогнозирования образования шлаков, их накопления и воздействия на теплозащитное покрытие двигателя. Модели агломерации призваны дать распределение по размерам крупных частиц дисперсной фазы топлива, покидающих поверхность горения. Характеристики конденсированной фазы после этого могут быть рассчитаны в любом месте газодинамического тракта двигателя с использованием теоретических представлений и полуэмпирических данных о выгорании агломератов, образовании дисперсного оксида и эволюции характеристик полидисперсной системы частиц в потоке.

Настоящая работа посвящена моделированию агломерации в смысле априорной оценки размера агломератов на основе информации о компонентном и гранулометрическом составе топлива. В литературе имеются различные модели агломерации, которые можно отнести к эмпирическим, физическим, статистическим и геометрическим (на основе упаковки) [6]. Статистические модели можно разделить на два класса. В моделях первого класса [7, 8] необходимые данные получают на основе теоретических результатов стохастической геометрии и стереологии. В [7] средний размер области, окруженной частицами окислителя, определяется через известный закон их распределения по размерам в предположении случайного расположения в пространстве. В [8] предполагается, что количество частиц в произвольном объеме топлива является пуассоновской случайной величиной, из которой определяется количе-

ство частиц металла в сгоревшем слое топлива, участвующих в процессе агломерации. Модели второго класса используют методы пространственной статистики для извлечения информации из детальных структур (как правило, смоделированных) [6].

Кроме использования сложных детальных моделей представительного объема топлива, основанных на размещении заданного набора частиц в ограниченной области, разрабатываются альтернативные модели, основанные на использовании упрощающих предположений о структуре топлива с целью получения возможности аналитического исследования «регуляризованных» упаковок.

Типичной моделью, учитывающей структуру топлива в виде упаковки частиц, является «карманная» модель Коэна [9]. Предпосылкой агломерации считается концентрация частиц металла в так называемых «карманах» — пространственных областях между крупными частицами окислителя. В модели Коэна последние располагаются в вершинах куба. Массовая и объемная доли металла в карманах существенно превышают средние значения для топлива в целом, что увеличивает вероятность контакта и взаимодействия исходных частиц металла и способствует их слиянию в агломераты. Модель Коэна не требует сложных вычислений и может быть полезна для качественного описания и понимания эффектов, связанных с размером частиц перхлората аммония (ПХА).

На основе эмпирического анализа структуры топлив в данной работе предложена тетраэдрическая модель кармана. Частицы ПХА располагаются в вершинах правильного тетраэдра, а карман топлива соответствует внутреннему объему тетраэдра, заполненному смесью горючего-связующего и металла. Структура топлива (упаковка) представляет собой слои равносторонних треугольников, сдвинутых относительно друг друга таким образом, что шары в вершинах треугольников следующего слоя располагаются в центрах треугольников предыдущего слоя.

1. МОДЕЛЬ КАРМАНОВ КОЭНА

Дадим конспективное изложение модели Коэна [9]. Основное предположение состоит в том, что весь объем металла, содержащийся внутри одного кармана, объединяется в единую

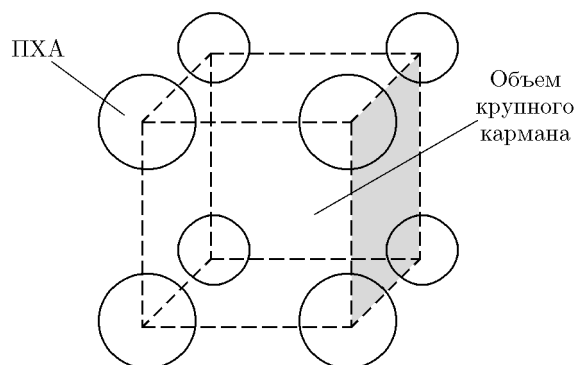


Рис. 1. Модель крупного кармана Коэна [9]

частицу. Зная объем кармана, можно вычислить «потенциальный» диаметр эквивалентного агломерата.

Самый крупный геометрический карман образован восьмью частицами окислителя самой крупной фракции (рис. 1). Если имеется лишь одна фракция окислителя, то карман заполнен связующим и металлом. В общем случае этот карман может содержать множество мелких карманов, образованных следующей по крупности фракцией окислителя, и это служит предпосылкой образования агломератов меньшего уровня крупности. В модели приняты упрощающие предположения: 1) регулярная кубическая решетка частиц окислителя; 2) частицы окислителя и металла монодисперсны, при этом окислитель может быть представлен несколькими монодисперсными фракциями.

Также предполагается, что на образование агломерата идет не весь металл геометрического кармана, а лишь та часть, которая успела расплавиться. Доля расплавленного металла γ зависит от скорости горения топлива и многих других факторов. В первом приближении принимается, что $\gamma = 1$, т. е. все частицы металла в кармане слились в один агломерат. При этом эффективный карман соответствует геометрическому, и расчет дает максимальный размер агломератов (оценку сверху).

Расчет проводится следующим образом. Последовательно для каждой фракции (начиная с самой крупной) рассчитывается количество частиц N в единице объема, расстояние между частицами Δ , объем кармана V_p . При условии, что весь алюминий в кармане сплавляется в единый агломерат ($\gamma = 1$), размер агломерата определяется по следующему соотношению (пересчет в сферу):

$$D_{agg} = (6/\pi)^{1/3} (\gamma \alpha_{Me} V_p)^{1/3}, \quad (1)$$

где α_{Me} — массовая доля металла в топливе. Количество крупных частиц N в единице объема топлива равно объемной доле крупного ПХА, деленной на объем одной крупной частицы:

$$N = \frac{6\alpha_{AP}/\pi D_{AP}^3}{\alpha_{AP} \left(\frac{\rho_{ox}}{\rho_{AP}} \right) + \alpha_{Me} \left(\frac{\rho_{ox}}{\rho_{Me}} \right) + \alpha_f \left(\frac{\rho_{ox}}{\rho_f} \right)}, \quad (2)$$

где α — массовая доля; D_{AP} — средний размер частиц окислителя, мкм; ρ_{ox} , ρ_{Me} , ρ_f — плотность окислителя, металла и связующего соответственно. В данном случае окислитель — ПХА, так что $\rho_{ox} = \rho_{AP}$.

Расстояние между крупными частицами определяется соотношением

$$\Delta = \frac{1 - N^{1/3} D_{AP}}{N^{1/3}}. \quad (3)$$

Объем крупного кармана есть объем куба с вершинами в центрах крупных частиц, ограничивающих карман, за вычетом объема сферы:

$$V_p = (\Delta + D_{AP})^3 - \frac{\pi}{6} D_{AP}^3, \quad (4)$$

где первое слагаемое равно объему куба, вершины которого находятся в центрах восьми сфер, ограничивающих карман (см. рис. 1); второе слагаемое выражает суммарный объем восьми фрагментов шара. Фрагмент ограничен тремя взаимно перпендикулярными плоскостями (гранями кубической ячейки), проходящими через центр шара и участком поверхности шара. Каждый фрагмент имеет объем 1/8 шара, а их суммарный объем соответствует объему целого шара. В предположении, что все частицы алюминия в кармане объединяются в единую частицу-агломерат, «потенциальный» диаметр агломерата вычисляется по соотношению (1).

Продемонстрируем ограниченность модели Коэна. Рассмотрим модельные топлива А и Б, составы которых приведены в табл. 1. Рассчитаем количество крупных частиц в единице объема и расстояние между ними. Согласно расчетам количество крупных частиц в единице объема для топлива А составляет $N_A = 2.255 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$, а для топлива Б — $N_B = 3.047 \cdot 10^{10} \text{ 1/м}^3$. При этом расстояния между крупными частицами ПХА равны $\Delta_A = 3.1 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ и $\Delta_B = 2.82 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

Таблица 1

Параметры модельных топлив

Компонент		α	ρ , г/см ³	D_{43} , мкм
Топливо А	ПХА	0.517	1.95	323
	Связующее	0.283	0.865	—
	Al	0.2	2.7	—
Топливо Б	ПХА	0.65	1.95	323
	Связующее	0.15	0.865	—
	Al	0.2	2.7	—

Таким образом, для топлива Б расчеты по модели Коэна провести невозможно, поскольку расположение частиц ПХА в вершинах куба приводит к отрицательным значениям расстояния между частицами $\Delta_B = -2.82$ мкм. Иными словами, структура топлива Б не соответствует кубической упаковке частиц окислителя по модели Коэна. При этом для топлива А расчет возможен: объем крупного кармана $V_p = 2.67 \cdot 10^{-11}$ м³, размер агломерата $D_{agg} = 141$ мкм.

2. ТЕТРАЭДРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАРМАНА

Пусть имеется топливо, состоящее из ПХА, Al и связующего. На основе эмпирического анализа структуры топлив предложена тетраэдрическая модель кармана, в которой карман топлива соответствует внутреннему объему треугольной пирамиды (правильного тетраэдра), занятому смесью связующего и металла. В вершинах тетраэдра расположены частицы ПХА. На рис. 2 представлена ячейка структуры топлива в тетраэдрической модели.

Для проведения вычислений и оценки размера агломерата рассмотрим треугольную

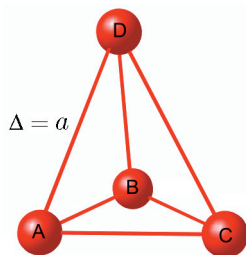


Рис. 2. Ячейка предполагаемой геометрической структуры топлива (частицы ПХА расположены в вершинах тетраэдра)

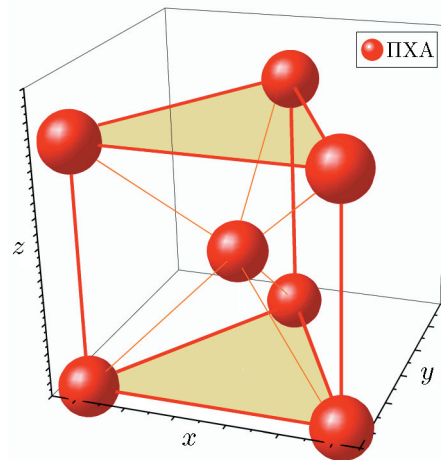


Рис. 3. Вспомогательное построение — фрагмент структуры топлива в форме правильной треугольной призмы

призму, состоящую из двух тетраэдров с одной общей вершиной (рис. 3). Такими призмами, как и тетраэдрами, можно неразрывно заполнить неограниченное пространство.

Расчет начинается с определения объемных долей компонентов по соотношению

$$\beta_i = \frac{\alpha_i \rho}{\rho_i}, \quad (5)$$

где β_i , α_i , ρ_i — объемная доля, массовая доля и плотность i -го компонента топлива; ρ — расчетная плотность топлива, которая определяется по формуле

$$\rho = \frac{1}{\frac{\alpha_{AP}}{\rho_{AP}} + \frac{\alpha_f}{\rho_f} + \frac{\alpha_{Me}}{\rho_{Me}}}. \quad (6)$$

Затем методом итераций подбирается такое расстояние a между центрами частиц ПХА, чтобы объемная доля ПХА в треугольной призме соответствовала вычисленной по соотношению (5) объемной доле ПХА в топливе. Общий объем призмы V_{prism} вычисляется как площадь основания, умноженная на удвоенную высоту тетраэдра (см. рис. 3). Объем ПХА V_{AP} внутри призмы равен 1.5 объема шара (частицы ПХА) и складывается из центрального шара и шести угловых фрагментов шаров, объем каждого из них равен 1/12 объема шара:

$$\begin{aligned} \beta'_{AP} &= \frac{V_{AP}}{V_{prism}} = \frac{V_{ball} + 6V_{ball}/12}{V_{prism}} = \\ &= \frac{\pi D_{AP}^3}{2\sqrt{2}a^3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Определив расстояние между шарами, необходимо рассчитать объем металла, который находится в кармане (в тетраэдре, рис. 2). Объем кармана V_{pocket} рассчитывается как объем тетраэдра V_{tet} за вычетом угловых частей тетраэдра V_{tet_part} , занятых ПХА. Для простоты приближенно считаем, что части, занятые ПХА, представляют собой не фрагменты шара, а тетраэдры с размером ребра, равным радиусу частицы ПХА ($D_{AP}/2$). Тогда объем кармана определяется из соотношения

$$V_{pocket} = V_{tet} - 4V_{tet_part} = \frac{\sqrt{2}a^3}{12} - 4 \frac{\sqrt{2}(D_{AP}/2)^3}{12} = \frac{\sqrt{2}}{12} \left(a^3 - \frac{D_{AP}^3}{2} \right). \quad (8)$$

С учетом объемной доли Al в топливе определим объем металла V_{Me} в кармане. Если весь металл объемом V_{Me} слился в один агломерат, при заданных параметрах его диаметр равен

$$D_{agg_tet} = \left(\frac{6\beta_{Me}V_{pocket}}{\pi} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

где D_{agg_tet} — расчетный размер агломерата, β_{Me} — объемная доля металла в условном топливе (связующее + металл), определяемая по формуле (5).

Вернемся к топливам А и Б из табл. 1. С использованием тетраэдрической модели рассчитаны значения a , Δ и D_{agg} . Для топлива А: $a = 455$ мкм, $\Delta = 132$ мкм, $D_{agg} = 149$ мкм; для топлива Б: $a = 411$ мкм, $\Delta = 88$ мкм, $D_{agg} = 130$ мкм. Таким образом, предложенная модель позволяет проводить расчеты для топлив (в данном примере — топливо Б), для которых модель карманов Коэна не дает решения.

3. СРАВНЕНИЕ С ДРУГИМИ МОДЕЛЯМИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета по моделям проводили на примере трех смесевых топлив на основе ПХА, связующего и алюминия, составы которых представлены в табл. 2 [10]. Экспериментальные размеры агломератов определяли методом отбора при давлении $4.3 \div 4.9$ МПа.

Сравнение экспериментальных данных и предложенной тетраэдрической модели проводили со следующими эмпирическими корреляциями и моделями в представлении [6]:

— корреляция Гермсена [11]

$$D_{Hermesen} = \frac{907.4}{r_b Y_{AP}}, \quad (10)$$

— корреляция Салиты [12]

$$D_{Salita} = \frac{869}{r_b (Y_{AP} + Y_{Al})^2}, \quad (11)$$

— корреляция Бекстеда [13]

$$D_{Beckstead} = \frac{1}{2} \left(\frac{\xi_{Al}}{\xi_{AP,C}} \right)^{1/3} D_{AP,C}, \quad (12)$$

— модель Коэна [9]

$$D_{Cohen} = \left(\frac{\rho_{Al} Y_{Al}}{\rho_{AP} Y_{AP,C}} \right)^{1/3} D_{AP,C}, \quad (13)$$

— модель Григорьева [7]

$$D_{Grigoriev} = \frac{2}{3} \xi_{Al}^{1/3} (1 - \xi_{AP,C})^{2/3} D_{AP,C}, \quad (14)$$

— корреляция Дютерка [14]

$$D_{Duterque} = 2.42 \frac{D_{Cohen}}{r_b} + 80.26. \quad (15)$$

В соотношениях (10)–(15) приняты следующие обозначения: $D_{AP,C}$ — размер частиц крупной фракции ПХА, мкм; Y — массовая доля компонента; ξ — объемная доля компонента; r_b — скорость горения, мм/с, индекс С соответствует крупной фракции.

На рис. 4 для трех составов смесового твердого топлива представлены результаты, полученные с использованием различных корреляций/моделей (точки, нанесенные в виде букв), а также экспериментальные данные (квадраты) и данные расчета по тетраэдрической модели карманов (кружки). Модель Коэна дает довольно высокие значения по сравнению с экспериментальными. С другой стороны, карманная модель Григорьева занижает значения размеров агломератов.

Значения D_{agg} , рассчитанные с использованием эмпирических корреляций Гермсена, Салиты, Дютерка и Бекстеда, ведут себя по-разному для данных трех топлив. Для топлив 1 и 3 размер D_{agg} , рассчитанный по зависимостям Гермсена, Салиты и Бекстеда, имеет близкие значения. При этом для топлива 2 расчет размера агломератов по корреляциям Гермсена, Салиты и Дютерка также дает близкие значения.

Таблица 2

Исследуемые составы топлив

Компонент	Топливо 1		Топливо 2		Топливо 3	
	α	D_{43} , мкм	α	D_{43} , мкм	α	D_{43} , мкм
Крупный ПХА	0.37	306	0.37	306	0.41	301
Мелкий ПХА	0.27	17.1	0.15	17.1	0.21	13.1
Связующее	0.18	—	0.30	—	0.20	—
Алюминий	0.18	29.2	0.18	29.2	0.18	15.2
Средний размер агломератов (эксп.) D_{43} , мкм	669		187		179	
Скорость горения, мм/с	11.5 ($p = 4.3$ МПа)		15.2 ($p = 4.4$ МПа)		39 ($p = 4.9$ МПа)	
Закон скорости горения $r = Bp^\nu$, где r — [мм/с], p — [атм]	$r = 5.21p^{0.21}$		$r = 6.12p^{0.24}$		—	

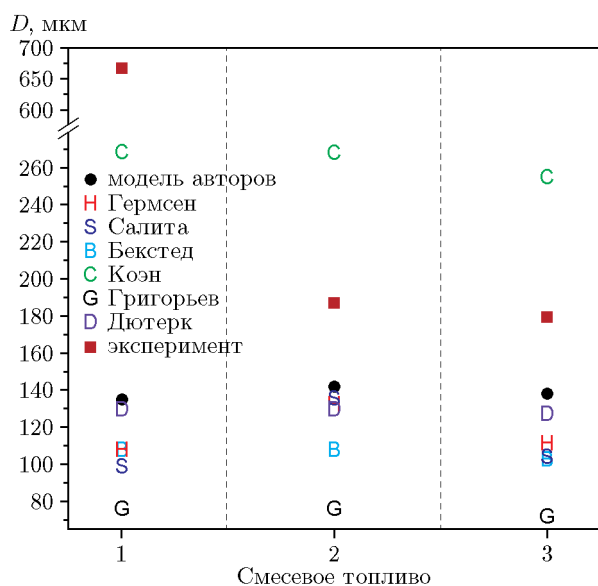


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные размеры агломератов для смесевых топлив 1–3

Из сравнения результатов различных моделей агломерации и экспериментальных данных (см. рис. 4) видно, что предложенная тетраэдрическая модель карманов в ряде случаев дает лучшие предсказания диаметра агломерата, чем другие модели.

Однако следует выделить топливо 1, для которого в экспериментах установлен размер агломератов $D_{agg} = 670$ мкм, но ни одна из представленных моделей не может предсказать такого размера. Для топлива 1 характерно явление межкарманной агломерации. В работах [15–17] выделены три вида агломерации алюминия — докарманная, карманная и межкар-

манная. Докарманная происходит при высоких скоростях горения и давлениях, а короткое время пребывания на поверхности горения не позволяет завершить агломерацию. В таком случае из одного кармана может образовываться более одного агломерата. При низких давлениях и скоростях горения весь металл в кармане принимает участие в образовании одного агломерата — карманная агломерация. Однако в некоторых случаях агломерат не покидает поверхность, а собирает другие агломераты, соединенные межкарманными мостиками. В этом случае происходит межкарманная агломерация.

Приведенные в статье расчетные формулы реализованы в виде файла-книжки Excel, который доступен по адресу: <https://kinetics.nsc.ru/data/RaschetAgglomeratsiiAl.xlsx>.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена новая, тетраэдрическая, модель для оценки размера агломератов металла, основанная на эмпирическом анализе структуры топлива. Согласно модели параметры кармана и размер агломератов вычисляются в предположении, что крупные частицы окислителя расположены в вершинах правильного тетраэдра. Внутренний объем тетраэдра заполнен смесью связующего и металла и образует карман, порождающий агломерат.

Дано краткое описание модели карманов Коэна и показано, что для некоторых топлив расчет размера агломератов по модели Коэна провести невозможно, в то время как использование тетраэдрической модели дает удовле-

творительные результаты.

Для трех составов смесового топлива выполнено сравнение экспериментальных данных с результатами расчета по тетраэдрической модели, модели Коэна и с эмпирическими корреляциями Гермсена, Салиты, Бекстеда, Григорьева, Дютерка. Показано, что тетраэдрическая модель в ряде случаев дает лучшие результаты для предсказания диаметра агломерата, чем другие формулы и корреляции. Таким образом, разработанная тетраэдрическая модель может быть использована для грубых оценок размера агломератов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачёв В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.
2. Babuk V. A., Vassiliev V. A., Sviridov V. V. Formation of condensed combustion products at the burning surface of solid rocket propellant // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 2000. — V. 185. — P. 749–776. — DOI: 10.2514/5.9781600866562.0749.0776.
3. Рашковский С. А., Гремячкин В. М. Методы моделирования агломерации алюминия при горении смесевых твердых ракетных топлив // Физ.-хим. кинетика в газовой динамике. — 2008. — Т. 7. — С. 41–49.
4. Липанов А. М. Физико-химическая и математическая модели горения смесевых твердых топлив. — Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2007.
5. Глотов О. Г. Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. IV. Влияние природы нитраминов на агломерацию и эффективность горения алюминия // Физика горения и взрыва. — 2006. — Т. 42, № 4. — С. 78–92.
6. Gallier S. A stochastic pocket model for aluminum agglomeration in solid propellants // Propell., Explos., Pyrotech. — 2009. — V. 34, N 2. — P. 97–105. — DOI: 10.1002/prep.200700260.
7. Григорьев В. Г., Куценогий К. П., Зарко В. Е. Модель агломерации алюминия при горении смесевых композиций // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 4. — С. 9–17.
8. Rashkovsky S. A. Metal agglomeration in solid propellants combustion. Part II: Numerical experiments // Combust. Sci. Technol. — 1998. — V. 136, N 1-6. — P. 149–169. — DOI: 10.1080/00102209808924169.
9. Коэн Н. С. Модель «карманов» для описания процесса агломерации алюминия в смесевых ракетных топливах // Аэрокосм. техника. — 1984. — Т. 2, № 2. — С. 67–75.
10. Glotov O. G., Zarko V. E., Karasev V. V., Beckstead M. W. Condensed combustion products of metalized propellants of variable formulation // 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 12–15 Jan. 1998, Reno, NV, USA. — DOI: 10.2514/6.1998-449.
11. Willoughby P. G., Baker K. L., Hermesen R. W. Photographic study of solid propellant burning in a acceleration environment // Symp. (Int.) Combust. — 1971. — V. 13, N 1. — P. 1033–1045. — DOI: 10.1016/S0082-0784(71)80102-9.
12. Salita M. Survey of recent Al_2O_3 droplet size data in solid rocket chambers, nozzles, and plumes // 31st JANNAF Combustion Meeting. — 1994. — V. 1. — P. 1–18.
13. Beckstead M. W. A model for solid propellant combustion // Symp. (Int.) Combust. — 1981. — V. 18, N 1. — P. 175–185. — DOI: 10.1016/S0082-0784(81)80022-7.
14. Duterque J. Experimental studies of aluminum agglomeration in solid rocket motors // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 1997. — V. 4, N 1-6. — P. 693–705. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v4.i1-6.650.
15. Бабук В. А., Белов В. П., Ходосов В. В., Шелухин Г. Г. Исследование агломерации частиц алюминия при горении в составе смесевых конденсированных систем // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 20–25.
16. Бабук В. А., Ивоненко А. Н., Низяев А. А. Расчет характеристик агломератов при горении высокоэнергетических смесевых твердых топлив // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т. 51, № 5. — С. 44–56. — DOI: 10.15372/FGV20150505.
17. Maggi F., Bandera A., De Luca L. T. Approaching solid propellant heterogeneity for agglomerate size prediction // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 25–28 July, 2010. — AIAA 2010-6751. — DOI: 10.2514/6.2010-6751.

Поступила в редакцию 09.11.2022.

Принята к публикации 14.12.2022.