

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Струнина, В. Т. Мартемьянова и др. ФГВ, 1974, 10, 4.
2. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1976, 12, 2.
3. А. Г. Струнина, Н. И. Ваганова, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1977, 13, 6.
4. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1978, 14, 4.
5. В. И. Ермаков, А. Г. Струнина, В. В. Барзыкин. ФГВ, 1978, 14, 6.
6. А. Г. Струнина, В. И. Ермаков, Э. А. Аверсон. ФГВ, 1979, 15, 4.
7. С. В. Костиц, А. Г. Струнина. ФГВ, 1979, 15, 5.
8. Вспомогательные системы ракетно-космической техники. М.: Мнр, 1970.
9. К. Г. Шкадинский, Б. И. Хайкин, А. Г. Мержанов. ФГВ, 1974, 7, 1.

МОДЕЛЬ АГЛОМЕРАЦИИ АЛЮМИНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

В. Г. Григорьев, К. П. Куценогий, В. Е. Зарко

(Новосибирск)

Отличительная особенность горения гетерогенных металлсодержащих составов — агломерация, т. е. укрупнение за счет слияния частиц металла при прохождении волны горения через конденсированное вещество, в результате чего поверхность горения покидают частицы с размерами, намного превышающими исходные частицы металла [1, 2]. Несмотря на то, что изучению агломерации посвящено значительное число работ, в настоящее время практически отсутствует экспериментально обоснованный механизм агломерации алюминия при горении смесевых составов на основе перхлората аммония [2].

В работе [3] на основе анализа экспериментальных данных предложено механизм агломерации алюминия при горении таких смесей, который предполагает слияние частиц металла в пределах ячеек между зернами окислителя, в результате чего образуются агломераты с размерами, определяемыми величиной ячеек и содержанием в них алюминия. Ранее предположение о возможности образования агломератов путем накопления частиц металла в замкнутых «карманах» (pockets) между частицами окислителя высказано в работе [4], однако никаких количественных данных по размерам агломератов в ней не приведено. В литературе отсутствуют систематические количественные данные о влиянии структуры упаковки дисперсных компонентов в композиции на размер образующихся при ее горении агломератов. Эти обстоятельства явились причиной постановки задачи экспериментального исследования агломерации алюминия при вариации дисперсности и содержания компонентов в смеси [3] и давления среды [5]. Цель данной работы — дать теоретическое обоснование полученных экспериментальных закономерностей агломерации на основании статистического рассмотрения упаковки дисперсных компонентов в смесевой композиции.

При изучении плоских срезов (шлифов) установлено [5], что при относительно невысоком объемном содержании окислителя смесевая композиция может быть рассмотрена как разупорядоченная упаковка, состоящая из твердых частиц (окислителя и металла) и непрерывного связующего. Поскольку частицы перхлората аммония (ПХА) намного превышают в размерах частицы алюминия, в промежутках между зернами окислителя образуются скопления частиц металла, диспергированных случайным образом в связующем и контактирующих между собой. Для рассмотренных в [5] составов (табл. 1) ячейки со «скоплениями» металла имеют в основном замкнутый (ограниченный частицами ПХА) вид. На

Таблица 1

Характеристики исследованных композиций [5]

Номер состава	β_{Al}	$\beta_{ПХА}$	$D_{ПХА},$ мкм	$\tilde{V}_{ПХА}$	Номер состава	β_{Al}	$\beta_{ПХА}$	$D_{ПХА},$ мкм	$\tilde{V}_{ПХА}$
1	0,12	0,37	50	0,4	7	0,12	0,37	220	0,70
2	0,12	0,37	75	0,3	8	0,17	0,37	280	0,16
3	0,12	0,37	110	0,25	9	0,27	0,33	75	0,30
4	0,12	0,37	200	0,18	10	0,27	0,33	110	0,25
5	0,12	0,37	280	0,16	11	0,27	0,33	200	0,18
6	0,12	0,37	360	0,16	12	0,27	0,33	220	0,70

Примечание. β — объемная доля, D — средний диаметр частиц, $\tilde{V}$ — коэффициент вариации распределения частиц по размерам.

рис. 1 показана фотография шлифа для состава с $\beta_{Al} = 0,12$, $\beta_{ПХА} = 0,37$ и $D_{ПХА} = 110$ мкм. Следует учесть, что в трехмерной упаковке каждая ячейка дополнительно ограничена в направлении, перпендикулярном плоскости рисунка.

Вследствие большого различия геометрических масштабов твердых компонентов упаковку частиц в композиции можно рассматривать последовательно, а именно, при изучении распределения частиц ПХА в объеме образца частицы металла можно включить в состав непрерывной фазы, так как из-за малости их размера и невысокого содержания твердых компонентов в композиции металл не должен оказывать влияния на упаковку значительно более крупных зерен окислителя. На следующем этапе рассматривается система металл — связующее и находятся характеристики упаковки частиц алюминия. В соответствии с [3] на первом этапе требуется определить размер ячеек между частицами окислителя, на втором — взаимное расположение частиц металла, поскольку контакт частиц — необходимое условие их агломерации при прохождении волны горения через конденсированное вещество.

Рассмотрим двухфазную систему металл — связующее. Будем полагать для простоты, что частицы металла монодисперсны и имеют сферическую форму. Тогда основным условием, которое определяет любое размещение таких частиц в упаковке, служит координационное число N_k , т. е. среднее число контактов, приходящееся на одну частицу. Для упорядоченных упаковок N_k задается их геометрией и может быть легко

найден [6]. В [7] показано, что такие симметричные упаковки можно рассматривать как частные случаи более общих нерегулярных размещений. Если за исходную координацию шаров в неупорядоченной упаковке принять координацию шаров вокруг какого-либо выбранного, то та же координация будет иметь место и вокруг любого другого шара в пределах первой координационной сферы. Эти новые координационные сферы включают в себя шар, выбранный в качестве начального (находящийся в центре сферы), далее, наружные шары первой координационной сферы и, наконец, наружные шары второй координационной сферы. В результате обра-

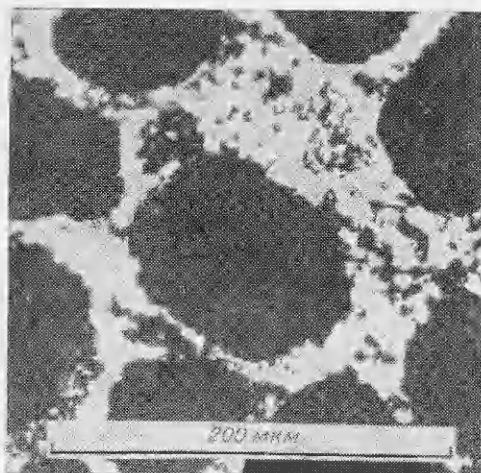


Рис. 1.

зуется агрегат со все возрастающими размерами [7]. Единственное условие, которому должны подчиняться подобные агрегаты, состоит в том, что для любой точки внутри агрегата существует некоторое конечное число соседей, не большее 14 [7].

Координационное число служит [8] частным параметром функции радиального распределения $f(R)$, которая представляет собой [7] вероятность нахождения частиц случайного ансамбля на расстоянии R от центра заданной частицы. Теоретически рассчитать функцию радиального распределения применительно к любым гетерогенным системам до сих пор не представляется возможным. Только для статистических смесей, которые моделируются пуассоновскими упаковками, можно рассчитать эту функцию для случая монодисперсных сфер [8].

Композиции, рассмотренные в [5], характеризуются относительно небольшими содержаниями металла и соответственно невысокими значениями N_k . Для таких смесей для определения N_k можно воспользоваться соотношением [9], выведенным в предположении, что число контактов распределено по закону Пуассона

$$N_k = -8 \ln(1 - \beta), \quad (1)$$

где $\beta = \beta_{Al}/(\beta_{Al} + \beta_{св}) = \beta_{Al}/(1 - \beta_{ПХА})$ — объемная доля частиц алюминия в системе, $\beta_{Al}, \beta_{св}, \beta_{ПХА}$ — объемное содержание компонентов в композиции; объемные доли гетерогенных компонентов (ПХА и Al) β_i связаны с концентрациями частиц (числом частиц в единице объема N_i) очевидными соотношениями $\beta_i = \frac{\pi}{6} D_i^3 N_i$ (D_i — диаметры частиц). Ввиду монодисперсности частиц N_k по соотношению (1) не зависит от их размера. Вычисление среднего числа контактов по формуле (1) дает для составов 1—7 $N_k = 1,7$, для состава 8 $N_k = 2,5$ и для составов 9—12 $N_k = 4,1$. Очевидно, что при уменьшении объемной доли частиц уменьшается число контактов, приходящихся на одну частицу, и уменьшается вероятность связанности структуры, т. е. вероятность того, что между любыми двумя частицами в двухфазной системе существует непрерывный (от частицы к частице) путь.

В работе [10] получена критическая оценка минимального числа контактов $N_k^* = 2$, при котором структуру еще можно считать полностью связанной. При $N_{kmin} < N_k < N_k^*$ возможно сохранение одной или нескольких непрерывных цепочек частиц, простирающихся от одного края смеси до другого. При $N_k < N_{kmin}$ вероятность существования бесконечно протяженных цепочек частиц близка к нулю. Соотношение между N_{kmin} и критерием связанности системы N_k^* имеет вид [10]

$$N_{kmin} = [1 - f(0)] N_k^*, \quad (2)$$

где $f(0)$ — доля частиц, не имеющих контактов с другими частицами. При пуассоновском распределении вероятности контакта частиц имеем $f(0) \simeq 0,2$ и $N_{kmin} \simeq 1,6$. Таким образом, в исследованных составах частицы алюминия являются связанными, и необходимое условие агломерации частиц алюминия — их контакт друг с другом — выполняется.

Далее образец можно рассматривать как систему металл — связующее, в которую внедрены случайным образом частицы ПХА. Для неупорядоченной упаковки ячейки различаются как по форме, так и по размерам даже для упаковки монодисперсных шаров. Поэтому распределение ячеек по размерам может быть получено только при использовании статистических методов [11]. В соответствии с принципами стереологии [12] объем ячейки произвольной формы, заключенной между частицами ПХА, можно определить как объем эквивалентной сферы с диаметром,

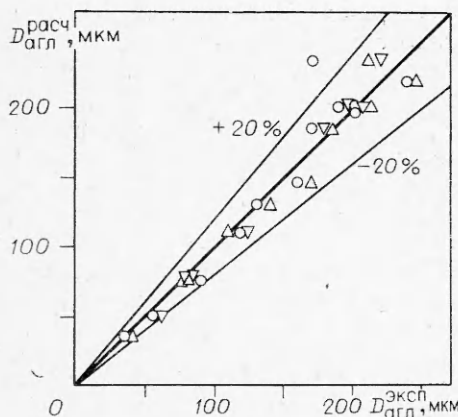


Рис. 2.

$$D_{агл}^{расч} = [\beta_{Al}/(1 - \beta_{ПХА})]^{1/3} \bar{l} = A(\beta_{ПХА}, \beta_{Al}) D_{ПХА}, \quad (5)$$

где $A = (2/3)[\beta_{Al}(1 - \beta_{ПХА})^2]^{1/3}$ — величина введенного в [5] коэффициента пропорциональности. На рис. 2 представлен график, на котором дано сравнение рассчитанных по формулам (3)—(5) величин диаметров агломератов $D_{агл}^{расч}$ для составов, исследованных в [5], с экспериментальными значениями $D_{агл}^{эксп}$. Ось абсцисс на графике соответствует экспериментально найденным в [5] величинам среднеобъемных диаметров агломератов, а ось ординат — значениям $D_{агл}^{расч}$. Там же указаны границы 20%-ной относительной ошибки. Видно хорошее согласие экспериментальных и расчетных величин для большинства из исследованных композиций в диапазоне давлений 1—40 атм.

Рассмотрение рис. 2 позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, расхождение между $D_{агл}^{расч}$ и $D_{агл}^{эксп}$ наблюдается только для составов с малой объемной долей металла, содержащих очень крупный (>300 мкм) окислитель. Занижение величин $D_{агл}^{расч}$ по сравнению с теоретической оценкой легко объяснить, если учесть, что, как уже отмечалось выше, для составов 1—7 [5] среднее число контактов между частицами N_k близко к $N_{k\min}$. Поэтому для этих составов возможно образование более чем одного агломерата в пределах каждой ячейки, когда диаметр зерен ПХА велик. В итоге это приводит к снижению среднего размера агломератов. Во-вторых, с ростом давления для этих составов улучшается соответствие опытных данных расчетным, что, вероятно, связано с более благоприятными условиями для контакта частиц в случае горения образцов при повышенных давлениях в связи с повышением температуры реагирующей поверхности и увеличением интенсивности газификации связующего.

Следует заметить, что соотношение (3) для среднего размера ячеек основано на закономерностях геометрической вероятности и не содержит никаких произвольных допущений. Поэтому (3) в принципе справедливо и для упаковки, состоящей из полидисперсного набора частиц, однако оно позволяет получать только средний размер ячеек в упаковке [12]. В то же время, поскольку в эксперименте наблюдается распределение агломератов по размерам, интересно попытаться найти связь между функциями распределения агломератов и ячеек между зернами окислителя. Одна из возможностей определения размеров ячеек состоит в нахождении распределения расстояний между частицами (центрами частиц) в упаковке. Решение задачи о расстояниях между случайными точками в пространстве известно [13]. Его можно распространить на случай, когда случайные точки заменяются системой монодисперсных шаров и рассматривается распреде-

равным среднему свободному расстоянию $\bar{l}$ (между поверхностями частиц)

$$\bar{l} = 4(1 - \beta_{ПХА})/S_{ПХА}, \quad (3)$$

где $S_{ПХА}$ — удельная поверхность порошка окислителя (суммарная поверхность частиц, отнесенная к единице их объема). Для системы монодисперсных сферических частиц ($S_{ПХА} = 6/D_{ПХА}$) (3) принимает вид

$$\bar{l} = (2/3)(1 - \beta_{ПХА})D_{ПХА}. \quad (4)$$

Знание $\bar{l}$ позволяет определять ожидаемый размер агломератов при известном содержании металла в ячейках

ление этих шаров в пространстве [14]. Среднее межцентровое расстояние определяется при этом из выражения

$$R = 0,277(4\pi/3\beta_{\text{ПХА}})^{1/3}D_{\text{ПХА}}. \quad (6)$$

Однако применимость формулы (6) ограничена малыми концентрациями частиц. Решение теряет физический смысл при $\beta_{\text{ПХА}} \geq \beta_1 = 0,0884$, поскольку при $\beta_{\text{ПХА}} > \beta_1$ происходит «внедрение» частиц друг в друга. Последнее обусловлено тем, что при выводе (6) не введено ограничивающее условие: $R \geq D_{\text{ПХА}}$ ($R = D_{\text{ПХА}}$ — условие касания частиц).

Учитывая указанное обстоятельство, рассмотрим упаковку, состоящую из набора полидисперсных частиц. Примем в качестве первого приближения, что систему частиц можно характеризовать средним размером $\bar{D}$ и что среднее свободное расстояние связано со средним межцентровым расстоянием простой зависимостью $l = R - \bar{D}$. Тогда за основу при рассмотрении задачи можно взять распределение центров сферических частиц как случайных точек в пространстве и принять, что число точек, появляющихся во всякой области объема V , есть пуассоновская случайная величина со средним NV [13].

Если $R_1, R_2, \dots, R_n$ — расстояния от некоторой фиксированной точки до ближайшей случайной точки соответственно 1, 2, ..., n , то функция радиального расстояния до n -го ближайшего соседа запишется как [13]

$$f_n(R_n) dR_n = \frac{3 \left(\frac{4}{3} \pi N \right)^n}{\Gamma(n, \alpha)} \exp \left(- \frac{4}{3} \pi N R_n^3 \right) R_n^{3n-1} dR_n, \quad (7)$$

где α — параметр усечения функции распределения; N_∞ — число частиц (центров частиц) в единице объема; $\Gamma(n, \alpha) = \int_\alpha^\infty t^{n-1} e^{-t} dt$ — неполная гамма-функция [15]. Здесь учтено, что в качестве нижнего предела интегрирования нужно брать величину $R_n = \bar{D}$, а не $R_n = 0$, что проявляется в замене функции $\Gamma(n)$ [13] на неполную гамма-функцию $\Gamma(n, \alpha)$.

Анализ размерностей наводит на мысль, что $f_n(R_n)$ есть функция одного составного параметра $\lambda = NR_n^3$, поэтому, сделав замену $x = (4/3)\pi\lambda$, перепишем (7) в виде

$$f_n(x) dx = x^{n-1} e^{-x} dx / \Gamma(n, \alpha). \quad (8)$$

После преобразований получим очевидное соотношение

$$x = R_n^3 \bar{V} N / (\bar{D})^3 = 8\beta_{\text{ПХА}} R_n^3 / (\bar{D})^3,$$

где $\beta_{\text{ПХА}} = NV$ — объемная доля частиц ПХА в композиции; $V = (\pi/6)\bar{D}^3$ — средний объем частиц.

Как видно из (8), функция распределения межцентровых расстояний имеет вид гамма-распределения [15], в котором гамма-функция заменена неполной гамма-функцией. При интегрировании (8) с целью нахождения R и дисперсии величины R необходимо в качестве нижнего предела брать величину $x = (4/3)\pi N(\bar{D})^3 = 8\beta_{\text{ПХА}}(\bar{D})^3/\bar{D}^3$. Вычисление моментов функции $f_n(x)$ [15] дает значения безразмерных (нормированных на $\bar{D}$) величин математического ожидания

$$E_n = \frac{1}{2} [\bar{D}^3 / (\beta_{\text{ПХА}}(\bar{D})^3)]^{1/3} \frac{\Gamma(n + \frac{1}{3}, \alpha)}{\Gamma(n, \alpha)}, \quad (9)$$

дисперсии

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{4} \left[\frac{\bar{D}^3}{\beta_{\text{ПХА}}(\bar{D})^3} \right]^{2/3} \frac{1}{[\Gamma(n, \alpha)]} \{ \Gamma(n, \alpha) \Gamma(n + 2/3, \alpha) - [\Gamma(n + 1/3, \alpha)]^2 \}^{1/2} \quad (10)$$

Т а б л и ц а 2

Результаты расчетов на ЭВМ параметров упаковки

n	$\beta_{\text{ПХА}}=0,33$ $\bar{D}^3/(\bar{D})^3=1$		$\beta_{\text{ПХА}}=0,33$ $\bar{D}^3/(\bar{D})^3=1,27$		$\beta_{\text{ПХА}}=0,37$ $\bar{D}^3/(\bar{D})^3=1$	
	E_n	$10 \cdot \tilde{V}_n$	E_n	$10 \cdot \tilde{V}_n$	E_n	$10 \cdot \tilde{V}_n$
1	1,105	0,815	1,130	0,988	1,095	0,762
2	1,130	0,955	1,164	1,137	1,116	0,851
3	1,163	1,062	1,210	1,228	1,144	0,960
4	1,204	1,134	1,268	1,297	1,175	1,073
5	1,245	1,197	1,335	1,338	1,221	1,120
6	1,310	1,247	1,406	1,332	1,272	1,180
7	1,370	1,222	1,478	1,234	1,325	1,182
8	1,430	1,159	1,546	1,172	1,380	1,033
9	1,488	1,104	1,610	1,121	1,436	1,080
10	1,542	1,074	1,670	1,075	1,484	1,039
11	1,593	1,018	1,725	1,019	1,535	1,021
12	1,641	0,975	1,777	0,975	1,979	0,972
13	1,687	0,902	1,827	0,902	1,620	0,920
14	1,730	0,895	1,873	0,895	1,667	0,894
E_n	1,410	—	1,501	—	1,360	—

и величину коэффициента вариации

$$\tilde{V}_n = \frac{\sigma_n}{E_n} = \left\{ \frac{\Gamma(n+2/3, \alpha) \Gamma(n, \alpha)}{[\Gamma(n+1/3, \alpha)]^2} - 1 \right\}^{1/2}. \quad (11)$$

Из соотношений (9)—(11) видно, что моменты распределения зависят от концентрации частиц через $\beta_{\text{ПХА}}$, от распределения частиц по размерам через $\bar{D}^3/(\bar{D})^3$ и от порядкового номера соседа n , а коэффициент вариации — только от n . Используемые в [5] фракции окислителя имели гауссовские распределения частиц по размерам. Нетрудно показать [15], что в этом случае условие симметричности функции распределения диаметров частиц ПХА приводит к тому, что третий центральный момент функции распределения обращается в нуль, и тогда справедливо соотношение $\bar{D}^3/(\bar{D})^3 = 3\tilde{V}_{\text{ПХА}}^2 + 1$, где $\tilde{V}_{\text{ПХА}}$ — коэффициент вариации распределения размеров зерен ПХА соответствующих функций.

Величины $E_n(R_n)$, $\sigma_n^2(R_n)$ и $\tilde{V}_n(R_n)$ рассчитаны для ряда значений $\beta_{\text{ПХА}}$ и $V_{\text{ПХА}}$. Неполные гамма-функции вычислялись по стандартным подпрограммам на ЭВМ БЭСМ-6 для значений $n = 1, 2, \dots, 14$ ($n_{\text{max}} = N_{\text{к}}^{\text{max}} = 14$ [7]). В табл. 2 в качестве примера приведены результаты расчетов для $\beta_{\text{ПХА}} = 0,33$ ($V_{\text{ПХА}} = 0; 0,3$) и $\beta_{\text{ПХА}} = 0,37$ ($V_{\text{ПХА}} = 0$). Отмечается возрастание $\tilde{V}_n(R_n)$ при увеличении $V_{\text{ПХА}}$ и уменьшении $\beta_{\text{ПХА}}$. Интересно заметить, что, начиная с некоторого n ($n = 10$ в табл. 2), V_n перестает зависеть от $V_{\text{ПХА}}$. Это свидетельствует о том, что полидисперсность окислителя не оказывает влияния на «дальний порядок» в упаковке [8]. Кроме того, коэффициент вариации имеет максимальную величину для значения n , соответствующего среднему координационному числу для упаковки с данным содержанием окислителя $\beta_{\text{ПХА}}$. Вместе с тем наблюдается некоторое увеличение среднего межцентрового расстояния $\bar{E}_n = (1/14) \sum_{n=1}^{14} E_n(R_n)$ с ростом $V_{\text{ПХА}}$.

Используя свойства моментов функций [15], получим соотношения

для параметров распределения диаметров агломератов

$$\sigma(D_{\text{агл}}) = \sigma(\bar{l}) = \sigma(\bar{R}), \quad (12)$$

$$E(D_{\text{агл}}) = [\beta_{\text{Ал}}/(1 - \beta_{\text{ПХА}})]^{1/2} \bar{l}, \quad (13)$$

$$\tilde{V}_{\text{агл}} = \frac{\sigma(D_{\text{агл}})}{E(D_{\text{агл}})} = [(1 - \beta_{\text{ПХА}})/\beta_{\text{Ал}}]^{1/2} \frac{\sigma(\bar{R})}{\bar{l}}. \quad (14)$$

Формулы (12)–(14) позволяют определять средний размер и ширину спектра агломератов, исходя из параметров упаковки частиц в композиции. На рис. 3 кривыми представлены расчетные зависимости коэффициентов вариации $\tilde{V}_{\text{агл}}$ от $\tilde{V}_{\text{ПХА}}$ для составов с $\beta_{\text{ПХА}} = 0,33$ и $\beta_{\text{ПХА}} = 0,37$ (объемное содержание дисперсных компонентов в составах: 1 — 1–7, 2 — 8, 3 — 9–12). Там же показаны экспериментальные значения $\tilde{V}_{\text{агл}}$ из работы [5] (точки). Отметим удовлетворительное согласие расчетных и найденных в эксперименте величин $\tilde{V}_{\text{агл}}^{\text{экс}}$. Использование более широких фракций окислителя приводит к уширению спектра размеров агломератов, как предсказывается расчетной моделью.

Значения $D_{\text{агл}}$ для монодисперсной упаковки ($\tilde{V}_{\text{ПХА}} = 0$), рассчитанные по модели Кендалла — Морана (формула (13)), можно сравнить с величинами $D_{\text{агл}}^{\text{расч}}$, вычисленными по упрощенной схеме (формула (5)). Сопоставление величин $D_{\text{агл}}$, вычисленных с использованием двух различных расчетных схем, указывает на их близость. Так, относительная погрешность $\delta = (D_{\text{агл}} - D_{\text{агл}}^{\text{расч}})/D_{\text{агл}}$ для составов 1–8 и 9–12 составляет соответственно 9 и 12%. Выяснение вопроса о пределах применимости описанной здесь расчетной схемы не входило в задачу данной работы, однако мы полагаем, что она может быть использована при определении ожидаемых размеров агломератов для составов с $\beta_{\text{ПХА}} < 0,5$. Для расчета параметров более плотных неупорядоченных упаковок зерен окислителя в смесевых композициях могут быть применены методы математического моделирования [9].

Полученные в [3, 5] и в настоящей работе результаты позволяют сформулировать следующую модель агломерации алюминия при горении смесевых композиций на основе ПХА. Частицы алюминия в образце находятся в контакте друг с другом. Время нахождения частиц в прогретом слое к-фазы $\tau_1 \sim \kappa/u^2 \sim 10^{-3}$ с (κ — коэффициент температуропроводности) при $u \approx 10^{-2}$ м/с значительно превышает время τ_2 ($\tau_2 = 10^{-4} \div 10^{-5}$ с [2]), необходимое для образования между частицами контактных перешейков, способных удержать их вместе при воздействии газового потока. Поэтому при прохождении волны горения происходит последовательное слияние частиц, причем скорость продвижения тепловой волны в зазорах между зернами ПХА вследствие высокой теплопроводности алюминия будет больше, чем в среднем по образцу.

На начальном этапе спекания частиц, когда контактные площадки между ними малы, скорость теплоподвода от поверхности горения лимитируется контактным термическим сопротивлением частиц [16]. При температурах, близких к температуре плавления алюминия, когда происходит растрескивание окисной оболочки вследствие различия в термических коэффициентах расширения Al и Al_2O_3 [4] и образование «мостиков» из жидкого металла между частицами [2], скорость теплопереноса будет определяться теплопроводностью метал-

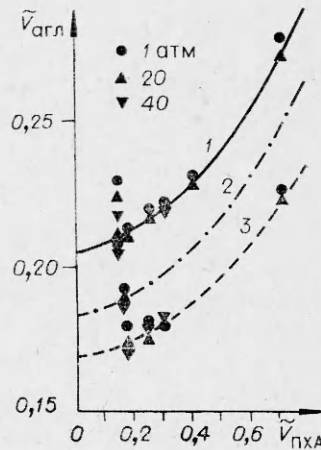


Рис. 3.

ла. Прогрессирующий разогрев каркаса из частиц алюминия и заполняющего пространство между ними связующего обуславливает интенсивную газификацию последнего. Это вызывает резкое повышение капиллярного давления и соответственно увеличение прочности на разрыв агрегатов частиц [17].

Достигнув максимума при некотором значении степени заполнения агрегатов жидкостью, прочность постепенно снижается и определяется суммарным действием капиллярных сил, обуславливающих образование «мостиков» жидкости между двумя частицами, и капиллярным давлением жидкости в агрегате [17]. Можно ожидать, что к моменту, когда наступает заметное уменьшение прочности за счет наличия жидкости, уже успевают образоваться контактные мостики. Наличие капиллярных сил должно дополнительно снизить требования к соотношению $\tau_2 \ll \tau_1$. Возможные окисляющие агенты для Al — это продукты разложения ПХА, а длина L диффузии газов через жидкое связующее при характерных временах процесса τ составляет $(D\tau)^{1/2} \sim 10^{-5} \div 10^{-6}$ м, поэтому возможно окисление только частиц металла, расположенных вблизи зерен ПХА. Скорость выгорания максимальна на границе контакта системы связующее — металл [18]. Благодаря этому происходит обособление каждой из ячеек, и агломерат в результате образуется как продукт слияния всех частиц металла, находящихся в данной ячейке.

На основании рассмотренных результатов можно сделать следующие выводы. Предложенная модель агломерации алюминия удовлетворительно описывает закономерности изменения размера агломератов при вариации дисперсности окислителя и содержания компонентов в композиции, а также при изменении ширины спектра размеров используемых частиц окислителя. Для определения среднего размера агломератов, образующихся при горении составов, содержащих узкие фракции окислителя, можно использовать упрощенную схему расчета диаметра агломератов. Изменение внешнего давления и линейной скорости горения образцов практически не оказывает влияния на размер агломератов в исследованном диапазоне изменения этих параметров. Ожидается, что данная модель агломерации будет справедлива и для составов с другими неплавящимися окислителями в тех случаях, когда выполняются соответствующие температурно-временные условия для слияния частиц металла в волне горения.

Авторы выражают благодарность Е. Г. Климовой за проведение расчетов на ЭВМ.

Поступила в редакцию
11/VIII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972.
2. В. Д. Гладун, Ю. В. Фролов и др. Агломерация порошкообразного металла при горении смесевых конденсированных систем. Препринт. Черноголовка, 1977.
3. В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко, К. П. Куценогий. 13 Всес. конф. по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Тез. докл., Одесса, 1979.
4. S. T. Crowe, P. G. Willoughby. AIAA-Paper, № 66—523.
5. В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко, К. П. Куценогий. ФГВ, 1981, 17, 3.
6. А. П. Карнаузов, А. В. Киселев. ЖФХ, 1957, 31, 12.
7. J. D. Bernal. Proc. Royal Soc., London, 1964, A280, 1382.
8. Р. И. Аюкаев, В. К. Кивран. Кинетика и катализ, 1975, 16, 4.
9. W. Haller. Chem. Phys., 1965, 42, 2.
10. J. Gurland.— In: Quantitative Microscopy. (R. T. De Hoff and F. N. Rhines, eds.). McGraw—Hill, New York, 1968, Chap. 9, p. 279.
11. А. Э. Шейдеггер. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.: Гостехиздат, 1960.

12. Stereology. Proc. 2. Internat. Congress on Stereology. Springer, New York, 1968.
13. М. Кендалл, П. Моран. Геометрические вероятности. М.: Наука, 1972.
14. С. Чандрасекар. Стохастические проблемы в физике и астрономии. М.: ИЛ, 1959.
15. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Советское радио, 1962.
16. А. В. Лыков. Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978.
17. Н. Schubert. Chemie — Ing. — Technik, 1973, 45, 6.
18. Н. Н. Бахман, А. Ф. Беляев. Горение гетерогенных конденсированных систем. М.: Наука, 1967.

ДИНАМИКА СГОРАНИЯ ГАЗА В ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ ПРИ НАЛИЧИИ ИСТЕЧЕНИЯ

В. В. Мольков, В. П. Некрасов

(Балашиха)

Актуальность вопроса взрывозащиты замкнутых объемов методом разгерметизации требует создания физико-математических моделей, позволяющих получать зависимости основных параметров сгорания газовой смеси (давление, скорость нарастания давления, температуру свежей смеси и продуктов сгорания и др.) от времени до и после вскрытия сбросных площадей. В то время как динамика сгорания газа в замкнутом объеме изучена достаточно хорошо [1—5], модели, описывающие процесс горения после разгерметизации объема, развиты слабо и обладают рядом недостатков.

Наиболее часто для определения площадей сбросных отверстий и проемов применяются приближенные методики [6, 7], не учитывающие динамику развития взрыва после начала сброса газа. Это может привести к необоснованно завышенным или опасно заниженным значениям площадей сбросных отверстий. Кроме того, такие методы не дают возможности исследовать влияние важных факторов, как, например, уровня давления разгерметизации на максимальное давление взрыва. В [8] изучалось изменение давления в течение взрыва только для докритического режима истечения и в узком диапазоне избыточных давлений ($\Delta p < 50$ кПа). В [9, 10] для объяснения экспериментально наблюдаемых при горении пиков давления введен фактор турбулизации. Предположение об истечении лишь свежей смеси [9], использование только закона сохранения массы и условия адиабатичности [10] не позволило авторам этих работ описать изменение давления от времени $p(t)$ в постоянном объеме при истечении газов; оценены лишь значения фактора турбулизации. Более развитая математическая модель, предложенная в [11], предполагает истечение либо свежей смеси, либо продуктов сгорания.

Цель настоящей работы — получение физико-математической модели, описывающей динамические характеристики сгорания газа в постоянном объеме при наличии истечения и позволяющей исследовать закономерности данного явления.

Рассматривается распространение пламени в модельном сферическом сосуде от центрально расположенного точечного источника зажигания. С момента воспламенения $t = 0$ до момента разгерметизации $t = t_1$ происходит горение газовой смеси в замкнутом объеме. Для этого периода применимы соотношения, полученные в [1—3]. В момент времени $t = t_1$ осуществляется мгновенная разгерметизация объема и начинается истечение газообразных продуктов через сбросное отверстие в среду с постоянным давлением p_0 . В общем случае до некоторого момента времени