

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
АГЛОМЕРАЦИИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ
ПРИ ГОРЕНИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко, К. П. Куценогий
(Новосибирск)

Процесс горения металлизированных смесевых составов включает в себя сложную последовательность превращений исходных частиц металла — агломерацию (укрупнение) на реагирующей поверхности топлива, воспламенение частиц и вынос их в газовую фазу, горение в факеле. Изучение явления агломерации важно как в связи с поиском путей увеличения полноты сгорания частиц металла (чаще всего алюминия) в ракетных двигателях [1], так и с точки зрения построения моделей горения металлизированных ракетных топлив [2].

Процесс агломерации частиц металла подвержен влиянию многих факторов: типа связующего и окислителя, концентрации и дисперсности вводимого металла, размера частиц окислителя и т. д. Считается [1], что скорость горения — определяющий фактор агломерации, и что любое изменение в составе смеси или в условиях проведения опыта, вызывающее увеличение скорости горения, приводит к снижению степени агломерации. Однако в последнее время на основании анализа обширного экспериментального материала универсальность этого подхода подвергнута сомнению [3].

Отсутствие экспериментально обоснованных механизмов агломерации объясняется в значительной степени методическими трудностями регистрации действительных размеров агломератов, образующихся на горячей поверхности. Дисперсный анализ конденсированной фазы обычно проводится либо посредством отбора частиц на периферии факела [1, 3], либо путем отбора (и закалки частиц в жидкости) по схеме «целевого заряда» [4]. В последнем случае частицы отбираются из зоны, непосредственно примыкающей к поверхности образца, однако наличие поперечного высокоскоростного газового потока служит мощным возмущающим фактором для процессов, происходящих на поверхности горения [1, 5]. Анализ литературы показывает, что данные о размерах частиц, появляющихся на поверхности горения, практически отсутствуют. В широко используемой в настоящее время методике кино съемки в собственном свечении, основанной на регистрации треков горящих частиц, покидающих поверхность [1], определяются размеры зоны пламени горящих частиц, а не истинные диаметры агломератов.

Для получения достоверных и надежных данных о размере агломератов на реагирующей поверхности необходима экспериментальная методика регистрации дисперсной фазы, не вносящая возмущений в исследуемый процесс и обеспечивающая возможно более полную представительность частиц по размерам. Трудность визуализации, вызванная наличием вокруг

горящих частиц металла зоны накопления конденсированной окиси алюминия, имеющей высокую излучательную способность, преодолевается при использовании достаточно мощной внешней подсветки; при этом дополнительно появляется возможность регистрации негорящих частиц. В работах [6, 7] в качестве источников света использовались ртутные лампы сверхвысокого давления, в работе [8] — ксеноновая стробоскопическая лампа ИСШ-500. В данной работе применялся световой блок на основе импульсной стробоскопической лампы ИСШ-400 [9], имеющей лучшие по сравнению с ИСШ-500 частотные характеристики.

С другой стороны, возможность выявления четкой корреляции между размером агломератов и каким-либо из факторов, влияющих на агломерацию, появляется только в том случае, если все остальные параметры жестко зафиксированы, ибо тщательно контролируются. Этому обстоятельству зачастую не уделяется достаточного внимания. В работах, посвященных изучению агломерации (см., например, [1]), как правило, не приводятся характеристики распределения по размерам порошкообразных компонентов, за исключением некоторого «среднего» размера частиц во фракции, в то время как используются обычно полидисперсные порошки. Известно [10], что указания среднего размера и граничных размеров частиц во фракции порошкообразного материала, полученного, например, с помощью ситового отсева, еще недостаточно для описания фракции. Необходимо знание вида функции распределения и дисперсии распределения.

Отмеченные выше обстоятельства обусловили выбор экспериментального подхода и методики изучения агломерации и горения металла в данной работе.

Методика и экспериментальные результаты

В настоящей работе изучалось горение порошкообразного алюминия в составе модельных смесей на основе перхлората аммония, включавших кроме порошкообразных компонентов полимерное связующее. Исследовались смеси с невысоким содержанием окислителя с целью обеспечения разупорядоченности расположения частиц ПХА в матрице связующего и равномерности распределения металла в объеме смеси. Данные по объемному содержанию $\beta_{\text{ПХА}}$, β_{Al} и дисперсному составу компонентов приведены в таблице. Узкие фракции порошков ПХА и алюминия выделялись с помощью ситовой и воздушно-сепарационной методик из полидисперсного исходного материала. Избавиться от мелких (размером в несколько микрон) частиц удавалось только при трех-, пятикратном ситовом отсеве с последующей «прогонкой» фракции через лабораторный центробежный циклон. Выделенные фракции порошков имели гауссовские распределения частиц по размерам с коэффициентами вариации $\bar{V}_{\text{ПХА}}$ (отношение стандартного отклонения к среднему диаметру), изменяющимися для ряда значений средних размеров частиц окислителя 50—360 мкм в пределах 0,4—0,2. Коэффициент вариации для частиц алюминия равнялся 0,45.

При изготовлении некоторых составов использованы обычная ситовая фракция окислителя с относительно широким распределением частиц по размерам ($\bar{V} = 0,7$) и полидисперсный исходный порошок алюминия (см. таблицу). Измерения гранулометрического состава этого порошка показали, что распределение размеров частиц алюминия во фракции удовлетворительно описывается логнормальным законом [11] с параметром $\sigma_z = 0,5$, при этом среднегеометрический диаметр частиц $D_{50} = 14$ мкм, среднеобъемный диаметр $D_3 = 20$ мкм. Графики распределения частиц по размерам в использованных фракциях приведены на рис. 1, 2. Видно, что чем выше дисперсность фракции окислителя, тем шире в ней распределение частиц

Характеристики смесевых композиций и результаты опытов

Номер состава	β_{Al}	$\beta_{ПХА}$	$D_{Al'}$ мкм	$D_{ПХА'}$ мкм	$\tilde{V}_{ПХА}$	$p=1$ атм		$p=20$ атм		$p=40$ атм	
						$D_{агл'}$ мкм	$\tilde{V}_{агл}$	$D_{агл'}$ мкм	$\tilde{V}_{агл}$	$D_{агл'}$ мкм	$\tilde{V}_{агл}$
1	0,12	0,37	14	50	0,40	40	0,23	40	0,23	—	—
2	0,12	0,37	14	75	0,30	60	0,22	—	—	60	0,22
3	0,12	0,37	(**)	110	0,25	90	0,22	80	0,22	—	—
4	0,12	0,37	14	200	0,18	130	0,21	140	0,21	—	—
5	0,12	0,37	(**)	280	0,16	170	0,21	180	0,21	180	0,20
6	0,12	0,37	14	360	0,16	170	0,23	210	0,22	220	0,22
7	0,12	0,37	14	220*	0,70	160	0,28	170	0,27	—	—
8	0,17	0,37	(**)	280	0,16	200	0,19	210	0,19	200	0,19
9	0,27	0,33	14	75	0,30	80	0,18	—	—	80	0,18
10	0,27	0,33	(**)	110	0,25	120	0,18	110	0,18	120	0,18
11	0,27	0,33	14	200	0,18	180	0,18	190	0,17	190	0,17
12	0,27	0,33	14	220*	0,70	240	0,23	240	0,23	—	—

Примечания. 1) * широкая фракция окислителя, (**) полидисперсный алюминий; 2) коэффициенты вариации определяются из соотношений: $\tilde{V}_{ПХА} = 0,4 (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$ [16]; $\tilde{V}_{агл}^2 + 1 = \left[\exp \left(\frac{\lg^2 \sigma_g}{2C^2} \right) \right]^2$, где $C = 0,4343$ — постоянная [17].

по размерам. Это обусловлено трудностью получения узких фракций высокодисперсных порошков из-за частичной агрегации частиц в последних [10].

Графики, приведенные на рис. 1 и 2, получены в результате обсчета изображений частиц на экране измерительного микроскопа. Частицы ПХА (за исключением самой мелкой фракции) и алюминия имели форму вытянутых эллипсоидов с отношением осей $R = a/b \leq 1,5$. Поскольку измерения размеров частиц проводились на порошковых пробах, когда частицы располагаются так, чтобы принять устойчивое положение [10], то необходимо учесть это обстоятельство с тем, чтобы корректно построить распределение частиц по размерам. Фактор формы, связывающий размеры частицы — эллипсоида в стабильной ориентировке D_e (т. е. такой, какой мы ее видим

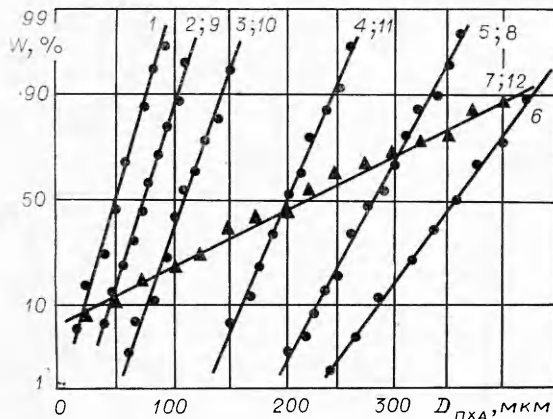


Рис. 1. Распределение частиц окислителя по размерам в использованных фракциях; W — доля частиц с размером, меньшим данного $D_{ПХА}$. Числа у прямых — номера составов, согласно таблице.

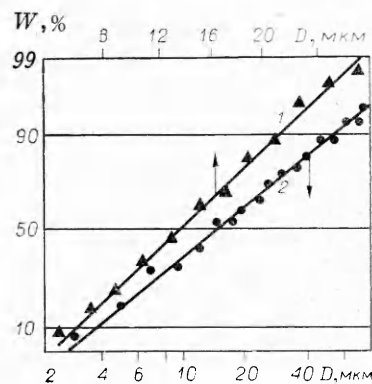


Рис. 2. Распределение частиц алюминия по размерам. 1 — выделенная фракция; 2 — исходный порошок.

на плоскости наблюдения) с размерами при случайной ориентировке частиц D [13], равен:

$$K_{\phi} = D/D_c = 1/2\{2 + (R^2\varepsilon)^{-1}\ln[1 + \varepsilon/(1 - \varepsilon)]\}^{1/2},$$

где $\varepsilon = (a^2 - b^2)^{1/2}/a$. Для использованных порошков $0,9 \leq K_{\phi} < 1$. Фракция ПХА с $D_{50} = 50$ мкм содержала частицы неправильной геометрической формы, поэтому диаметры частиц измерялись по Фере [10].

На основании измерения не менее 600 частиц в каждой фракции строились кумулятивные кривые распределения частиц по размерам, которые затем выравнивались на нормальной вероятностной бумаге. Аналогичным образом спрямлялась на логнормальной вероятностной сетке кривая распределения полидисперсной фракции алюминия, объем выборки в этом случае составил 2200 частиц. Для обсчета фракции компонентов использовано полуавтоматическое устройство, описанное в [12]. Оно же применялось для обработки кинограмм горения. Общая средняя ошибка при определении диаметра частиц с помощью этого устройства $\sim 5\%$.

Смесевые композиции готовились методом литья. Анализ плоских срезов (шлифов) показал, что при таком способе изготовления образцов размеры частиц ПХА не изменялись. Упаковка частиц в топливе на самом деле неупорядочена (рис. 3).

По определению неупорядоченности объемная доля частиц ПХА ($\beta_{\text{ПХА}}$) в различных частях образца должна быть одинаковой [13], поэтому ни одно из сечений не является предпочтительным. Для определения $\beta_{\text{ПХА}}$ по шлифам в данной работе использовался линейный метод [13], основанный на измерении доли общей длины случайной секущей, находящейся внутри контуров сечений частиц. Погрешность определения объемной доли складывается из систематических ошибок, обусловленных препарированием образца и связанных с недостаточным разрешением оптического микроскопа, а также статистических погрешностей измерения. Случайные погрешности линейного метода определения $\beta_{\text{ПХА}}$, рассчитываемые по соотношению $\sigma(\beta_{\text{ПХА}}) = 65 \left[\frac{\beta_{\text{ПХА}}}{N} (1 - \beta_{\text{ПХА}}) \right]^{1/2}$, зависят от концентрации частиц в системе и числа измеренных отрезков N [13]. Для исследованных композиций величина этой погрешности составляет 1% при $N = 100$ и $0,25\%$ при $N = 400$. Общая ошибка определения $\beta_{\text{ПХА}}$ в данной работе оценивалась в $2-3\%$. Измеренные в различных сечениях составов 1-8 и 9-12 значения $\beta_{\text{ПХА}}$ равнялись соответственно $0,37 \pm 0,01$ и $0,33 \pm 0,01$.

Шлифы выполнялись с помощью биологического ультрамикротомата. Для придания матрице связующего необходимой жесткости и предотвращения вырывания лезвием ножа микротомата частиц окислителя образцы охлаждались твердой углекислотой. Измерения проводились с помощью микроскопа, снабженного окуляром с перекрестием и механическим столиком. Количественную обработку равномерности распределения частиц алюминия в матрице (в пространстве между зернами окислителя) провести не удалось из-за «выкрашивания» частиц металла вследствие большого различия в механической прочности алюминия и замороженной матрицы — связующего. Тем не менее изучение срезов позволяет сделать качественный вывод о том, что металл распределен в матрице случайным образом.

Дисперсная фаза, образующаяся при горении образцов, регистрировалась на основе прямоотеневой микрокино съемки с применением импульсной подсветки [9]. Применялась оптическая схема эксперимента, аналогичная описанной в [8]. Экспериментально найденное разрешение схемы регистрации не хуже 15 мкм; величина исследуемого счетного объема при увеличениях $5-10^x$ составляет тысячные доли кубического сантиметра.

Движение частиц накладывает жесткие ограничения на длительность светового импульса. Так, при скорости движения частиц 1 м/с и увеличении 10^x для получения резкого изображения (при стандартной величине пятна рассеяния $3 \cdot 10^{-5}$ м) длительность импульса не должна превышать $3 \cdot 10^{-6}$ м. При работе со световым блоком на основе лампы ИСШ-400 длительность вспышки $0,5 \cdot 10^{-6}$ с [9]. Кинорегистрация осуществлялась на кинолентке 35 мм чувствительностью 100—300 единиц ГОСТа кинокамерой «Пентацет» в режиме «свободной протяжки» пленки. Направление движения кинолентки совпадало с направлением перемещения изображений частиц в плоскости фотослоя. Это

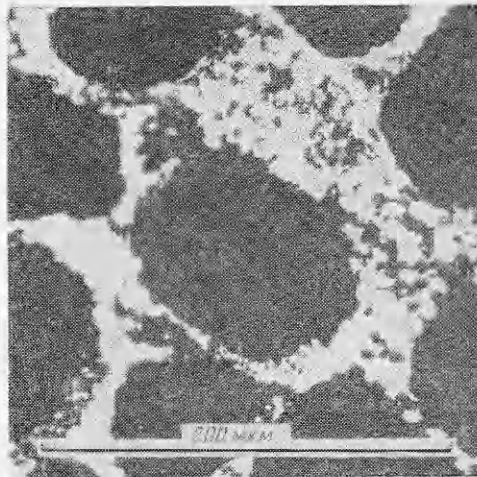


Рис. 3. Фотография шлифа смешанной композиции; $\beta_{Al} = 0,12$, $\beta_{ПХА} = 0,37$, $D_{ПХА} = 110$ мкм.

давало возможность дополнительно поднять верхний предел по скорости движения регистрируемых без смазывания изображения частиц. Экспериментальная проверка методики на потоках стандартных аэрозолей показала, что надежно регистрируются частицы размером 15 мкм, движущиеся со скоростью до 15 м/с. Благодаря спектральной фильтрации света, дающего изображение на кинолентке, осуществляемой посредством установки пакета паспортизованных светофильтров между приемным объективом и кинокамерой, интенсивность собственного свечения горящих частиц металла удавалось сделать ниже предела чувствительности фотоматериала. Это позволяло получать теневые изображения частиц (рис. 4, а) с приемлемым контрастом, допускающим количественную обработку. Для получения качественной информации о поведении агломератов на поверхности горения применялась также киносъемка камерой СКС-1М на цветную обратимую кинолентку при увеличении $1,5-3^x$ с частотой смены кадров до $5 \cdot 10^3$ с $^{-1}$.

В опытах при повышенных давлениях образцы сжигались в приборе высокого давления с проточной камерой в атмосфере азота. Давление в камере контролировалось с помощью образцового манометра, в ходе опыта велась запись давления с помощью тензометрического датчика. Кинорегистрация процесса горения проводилась через окна (диаметром 35 мм) из кварцевого стекла. Конструкция прибора исключала возможность попадания конденсированных продуктов сгорания на оптические окна. В ходе опыта по мере сгорания образца с помощью специального устройства выдвигался образец со скоростью, равной скорости горения, что позволяло сохранять постоянной во времени величину счетного объема.

Эксперименты по изучению агломерации проводились в диапазоне давлений 1—40 атм. При давлениях выше 40 атм концентрация частиц вблизи поверхности горения для большинства исследованных композиций была настолько велика, что не представлялось возможным количественно обработать кинограммы с целью определения распределения агломератов по размерам. Счетная концентрация частиц для различных композиций составляла $5 \cdot 10^2 - 10^3$ см $^{-3}$ при $p = 1$ атм и возрастала в среднем примерно на порядок при давлении 40 атм.

Экспериментальные данные свидетельствуют о значительной агломерации алюминия. Частицы металла на горячей поверхности имеют размеры до $300 \cdot 10^{-6}$ м. В опытах, в которых сводился баланс массы по ме-

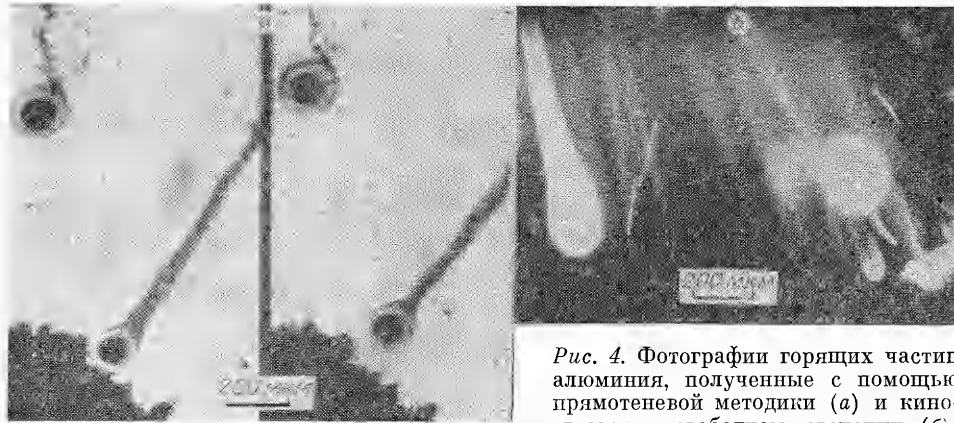


Рис. 4. Фотографии горящих частиц алюминия, полученные с помощью прямотеневой методики (а) и кино-съемки в свободном свечении (б).

таллу, установлено, что доля частиц с размером, меньшим предельного диаметра, надежно регистрируемых в данной методике частиц, не превышает по массе 15%.

Полученные распределения агломератов имели левостороннюю асимметрию с преобладанием счетной доли мелких частиц. Распределения размеров агломератов одинаково хорошо спрямлялись на функциональной сетке Вейбулла — Гнеденко и логарифмически-вероятностной сетке. При обработке результатов опытов предпочтение отдано логнормальному распределению ввиду удобства его непосредственного использования. Полученные из обработки кинограмм данные наносились на графики зависимости кумулятивной счетной доли от диаметра частиц в логнормальной анаморфозе, и по стандартной методике [11] определялись среднеобъемные диаметры. Результаты экспериментов приведены в таблице и на рис. 5. Можно отметить, что диаметр агломератов растет с увеличением размера частиц окислителя, увеличением содержания металла в композиции и практически не зависит от дисперсности алюминия и давления в приборе в изученных диапазонах вариации дисперсного состава металла и изменения давления. Кроме того, наблюдается уширение спектра агломератов при использовании более широких фракций окислителя.

Наряду с ростом $D_{агл}$ при увеличении размера зерен окислителя происходит монотонное уменьшение суммарной скорости горения образцов,

причем $u \sim D_{ПХА}^{-n}$, где $n = 0,37$ при $p = 40$ атм для составов 1—8 (см. рис. 5, б). Средний диаметр агломератов изменяется при вариации $D_{ПХА}$ по более сильному линейному закону. Отклонение от зависимости $D_{агл} = AD_{ПХА}$ ($A = A(\beta_{ПХА}, \beta_{Al})$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от объемного содержания алюминия и ПХА в композиции) наблюдается только для составов с очень крупным ($D_{ПХА} > 300$ мкм) окислителем и малым содержанием алюминия.

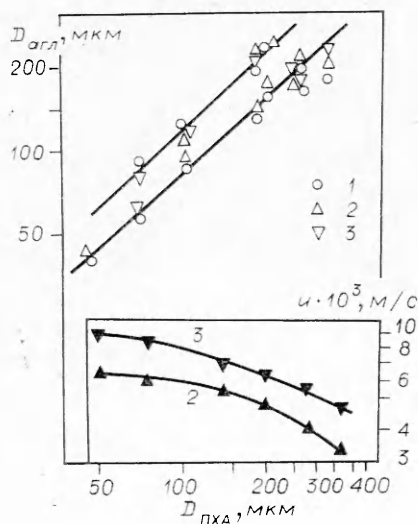


Рис. 5. Зависимость среднеобъемного диаметра агломератов $D_{агл}$ и скорости горения u от размера частиц окислителя $D_{ПХА}$ при давлении (атм): 1 — 1; 2 — 20; 3 — 40.

Горящие частицы алюминия в настоящей методике идентифицируются по наличию вокруг них характерного кругового «ореола». Отношение диаметра ореола к диаметру частицы D_0/D уменьшается с ростом давления в соответствии с эмпирическим соотношением $D_0/D \sim p^{-0,14 \div 0,18}$, при $p = 40$ атм $D_0/D = 1,1 \div 1,2$. На рис. 4 приведена типичная фотография, выполненная с кинограммы горения при атмосферном давлении; для сравнения показана фотография, полученная по методике съемки в собственном свечении. Видимые диаметры агломератов, регистрируемые различными способами, существенно отличаются, с ростом давления это отличие становится менее заметным. Отсюда следует, что данные по киносъемке в собственном свечении необходимо трактовать с известной осторожностью. В частности, наблюдаемое при варьировании давления изменение видимого диаметра агломератов может быть неверно истолковано как снижение размера агломератов при увеличении внешнего давления.

Обсуждение результатов

Методика теневой визуализации позволяет наблюдать за частицами металла только с момента их появления на поверхности образца. Нерегистрируемая предыстория образования агломератов включает в себя процессы частичного пиролиза окислителя и связующего и спекания касающихся друг друга частиц алюминия в цепочки. Кинограммы горения модельных смесей с монодисперсным металлом и отборы проб на стеклянные пластинки (зонды) показывают, что в начальной фазе агломераты существуют на реагирующей поверхности в виде «гроздьев» неправильной (вытянутой) формы (см. рис. 4, а). По данным микроскопического анализа заметных количеств связующего в таких агрегатах не содержится. Прогрессирующий разогрев агрегата за счет окисления металла и теплоподвода из факела приводит к плавлению и слиянию частиц в единую каплю, после чего происходит воспламенение образовавшегося агломерата. Этот момент фиксируется либо по резкому увеличению свечения (цветная киносъемка), либо по появлению характерного ореола (теневой метод).

Воспламенение агломератов в большинстве случаев происходит непосредственно на поверхности образца. При этом в месте контакта из-за резкого повышения температуры металла значительно увеличивается интенсивность пиролиза газифицирующихся компонентов смеси, и агломерат выносится потоком отходящих газов в факел. Отрыв от поверхности невоспламенившихся агрегатов регистрируется значительно реже. В этих случаях также наблюдается вначале образование капли металла, а затем воспламенение.

Следует отметить, что при горении образцов с полидисперсным порошком алюминия на реагирующей поверхности обычно сразу фиксируются сферические агломераты. Последнее можно объяснить более интенсивным разогревом и плавлением металлических агрегатов в приповерхностном слое за счет окисления мелких (1—5 мкм) частиц, обладающих большей удельной поверхностью. Аналогично, с ростом давления относительная доля агрегатов неправильной формы также уменьшается, что объясняется интенсификацией разогрева металла за счет повышения средней температуры поверхности и увеличения теплоподвода из факела.

Полученные в настоящей работе опытные данные свидетельствуют об определяющем влиянии геометрической упаковки и относительного весового содержания компонентов смеси на агломерацию порошкообразного алюминия. Это позволяет предложить сравнительно простую схему для расчета средних размеров агломератов на основании данных о содержании металла в ячейках (карманах) связующего между крупными зернами окислителя. Такой приближенный расчет проделан в работе [14]. Там же представлены экспериментальные данные по агломерации при атмосфер-

ном давлении, подтвердившие данные расчета. Есть полные основания утверждать, что предложенная в [14] модель справедлива и для более высоких давлений, о чем свидетельствуют результаты опытов при 20, 40 атм и данные работы [15], в которой изучалась агломерация алюминия при горении прессованных смесей ПХА — полимерное горючее при давлении 80 атм. Подробное изложение количественной модели агломераций металла с учетом полидисперсности окислителя и сопоставление с имеющимися экспериментальными данными будут приведены в следующем сообщении.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории В. М. Егорова (Томский госуниверситет) за помощь в приготовлении узких фракций порошка алюминия.

Поступила в редакцию
11/VIII 1980

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Ф. Похпл, А. Ф. Беляев и др. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М., Наука, 1972.
2. J. P. Renie, J. R. Osborn. AIAA Paper, No. 79—1131.
3. В. Д. Гладуи, Ю. В. Фролов и др. Агломерация частиц порошкообразного металла при горении смесевых конденсированных систем. Препринт. Черноголовка, 1977.
4. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., Наука, 1968.
5. A. Ganu, L. H. Cavenu, M. Summerfield. AIAA J., 1978, 7, 736.
6. J. Brulard. La Recherche Aerospatiale, 1967, 118, 25.
7. А. С. Борейшо, А. В. Иващенко, Г. Г. Шелухин. ФГВ, 1975, 11, 4, 659.
8. В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко.— В сб.: Физика горения и методы ее исследования. Вып. 5, Чебоксары, 1975.
9. В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко, В. Е. Хмелинский.— В сб.: Физика аэродисперсных систем. Вып. 14. Киев — Одесса, 1976.
10. С. Е. Андреев, В. В. Товаров, В. А. Перов. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М., Металлургия, 1959.
11. П. А. Коузов. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. Л., Химия, 1974.
12. А. Н. Анкилов, А. И. Бородулин и др. Коллоидный журнал, 1976, 38, 2, 325.
13. С. А. Салтыков. Стереометрическая металлография. М., Металлургия, 1970.
14. В. Г. Григорьев, В. Е. Зарко и др. 13-я Всес. конф. по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Тез. докл. Одесса, 1979.
15. Е. И. Гусаченко, Л. Н. Стесик. 13-я Всес. конф. по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Тез. докл. Одесса, 1979.
16. Г. Хан, С. Шапиро. Статистические модели в инженерных задачах. М., Мир, 1969.
17. Я. Б. Шор. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М., Советское радио, 1962.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГОРЕНИЯ ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕД

Г. С. Сухов, Л. П. Ярин
(Ленинград)

1. В ряде технологических процессов химическое взаимодействие жидкого и газообразного реагентов происходит в пузырьковых средах, образующихся при барботаже реагирующего газа через неподвижный или движущийся слой жидкости [1]. Для таких сред характерны относительно низкие (порядка 10^{-4} — 10^{-2}) массовые и достаточно высокие (порядка 10^{-1}) объемные содержания газовой фазы. Эти особенности в