

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ-АГЛОМЕРАТОВ АЛЮМИНИЯ В ВОЗДУХЕ. II. ДВИЖЕНИЕ И СТАДИИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ

О. Г. Глотов^{1,2}, Н. С. Белоусова^{1,2}, Г. С. Суродин¹

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

²Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск,
nata.bel.94@mail.ru

Исследовано горение алюминиевых частиц-агломератов диаметром $215 \div 840$ мкм в свободном падении в воздухе при атмосферном давлении. Первоначально сферически-симметричное горение сменяется асимметричным, происходит фрагментация; в итоге процесс горения заканчивается с образованием оксидного остатка. Перечисленные события характеризуются соответствующим временем. В данной статье определена длительность стадии симметричного горения — в среднем 0.5 ± 0.1 по отношению к времени горения. Получены эмпирические аппроксимирующие зависимости координаты и скорости от времени ($x(t)$ и $v(t)$) для частиц разных диаметров. Для проведения аналитических расчетов движения горящих частиц вязкость воздуха в окрестности частицы выбрана равной $6.98 \cdot 10^{-5}$ Па·с, что соответствует осредненной температуре 2005 К. Путем сопоставления эмпирических и расчетных зависимостей $x(t)$ и $v(t)$ определен эффективный аэродинамический коэффициент сопротивления частицы в зависимости от ее размера в форме $C_d(D, Re) = (9.33 + 0.13D)/Re$, где Re — число Рейнольдса из диапазона $0.2 < Re < 5.2$. Для оценочных расчетов можно принять $C_d = 77/Re$.

Ключевые слова: алюминиевый агломерат, диаметр, горение в свободном падении в воздухе, стадии симметричного и асимметричного горения, движение частицы, температура горения, коэффициент аэродинамического сопротивления.

DOI 10.15372/FGV2024.9442

EDN NIZQOT

ВВЕДЕНИЕ

Горение металлических частиц осуществляется в различных устройствах или установках с целью использования запасенной химической энергии [1, 2], для получения целевого продукта — дисперсного оксида или нитрида с заданными свойствами [3–6], для создания световых и звуковых эффектов или совершения механической работы (пиротехнические изделия, актуаторы, резаки) [7–9]. Типичные способы организации процесса горения металлического горючего — введение частиц металла в состав смесевых систем (ракетные, гидрореагирующие и плазменные топлива [1, 10, 11], пиросоставы [7], композиты [12]); осуществление реагирования частиц в газодисперсном факеле или газовзвеси [3–6, 13], в том числе в ударной или детонационной волне [14, 15]. Во многих случаях протекание реакции ограничено временем пребывания частиц в высокотемпературной зоне, будь то фронт горения газовзвеси, камера сгорания ракетного двигателя [16] либо двухфазная струя за соплом. Время нахождения частиц в «активной зоне» горения определяется размером зоны и скоростью движения частиц. Для оптимизации процесса горения необходимо уметь рассчитывать движение горящих частиц в газообразной среде. Движение и коэффициент сопротивления частиц играют важную роль в технологических процессах, например, в газодинамическом и детонационном напылении [17]. Однако литературные данные о закономерностях движения горящих частиц (в частности, о коэффициенте аэродинамического

сопротивления C_d) скудны. Для горящих частиц металла размерами порядка сотен микрометров экспериментальные данные практически отсутствуют. Поэтому в математических моделях горения смесового топлива и в расчетах процессов в технических устройствах зачастую используют выражения для C_d , полученные в результате теоретического моделирования течения газа в окрестности частицы. В данной статье исследовано движение крупных горящих алюминиевых агломератов в воздухе и определены эмпирические значения C_d , рекомендуемые для практического применения. Вторая важная характеристика процесса горения крупных алюминиевых агломератов, определенная в данной работе, — длительность стадии симметричного горения. Экспериментальные данные об этой величине также практически отсутствуют в литературе. Вместе с тем наступление стадии асимметричного горения, проявляющееся в искривлении траектории движения частиц, очевидно, следует учитывать в усложненных моделях процессов в ракетном двигателе при расчете движения частиц в предснопой части камеры сгорания и взаимодействия частиц со стенками.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ИХ ОБРАБОТКА. СТАДИИ ГОРЕНИЯ

Целью работ данного цикла было исследование механизма превращения начального агломерата алюминия в финальную оксидную частицу в процессе горения в свободном падении в воздухе. В [18] сформулированы актуальные проблемы и вопросы: время и макрокинетика горения агломератов; доля оксида, накапливаемого на горячей частице (параметр φ); масса, размер и плотность финальной частицы оксида; закономерности фрагментации; подобие процессов горения крупных агломератов и монолитных частиц алюминия. Как указано во введении, описание движения частиц также относится к проблемам, требующим решения.

Для исследования горения частиц металлов мы используем метод модельных агломератов, основанный на сжигании образцов, генерирующих горящие частицы контролируемого размера [19]. Частицы могут быть или изначально монолитными, или агломератами, образующимися в ходе эксперимента. Конкретный вариант реализации метода, проведения и обработки экспериментов изложен в [18, 20]. Вкратце, образец представляет собой полоску из безметалльного топлива-матрицы (состав: ПХА/НМХ/связующее 34/39/27), с внедренными включениями — «заготовками» агломератов (Al/связующее 73.85/26.15, количество $8 \div 12$ шт.). Размер исходных частиц алюминия $0.5 \div 1.5$ мкм, связующее — активное, на основе метилполивинил-тетразольного полимера с нитроэфирно-нитраминным пластификатором [21–23]. Образец размером ($W \times L \times H$) примерно $2 \times 30 \times 1$ мм находится на держателе — кварцевой трубке диаметром 12 мм, на нижней ее стороне, обращенной к полу. Трубка закреплена горизонтально на высоте $2.5 \div 3.5$ м над поддоном, предназначенным для сбора остатков горения. При прохождении волны горения по образцу включения воспламеняются и выбрасываются, превращаясь в горящие агломераты, свободно падающие в воздухе. Видеосъемку падающих горящих частиц проводили со скоростью 25 кадр/с, остатки горения собирали в поддон. Видеозаписи преобразовывали в видеограммы — изображения, состоящие из последовательности информативных участков пронумерованных кадров. Пример видеограммы представлен на рис. 1.

Анализ видеограмм позволил выявить следующие особенности. (1) Трек у горящих частиц алюминия нечеткий и размытый, поскольку алюминий горит в парофазном режиме и зона горения удалена от поверхности частицы. Для сравнения: зона горения частиц титана находится на поверхности и потому их трек более четкий [24, 25]. (2) Частицы-агломераты в процессе горения в воздухе могут фрагментировать: как правило, наблюдаются редкие выбросы единичных фрагментов или струй (фрагментации будет посвящена отдельная статья цикла). (3) Для большинства частиц наблюдаются аномалии в характере

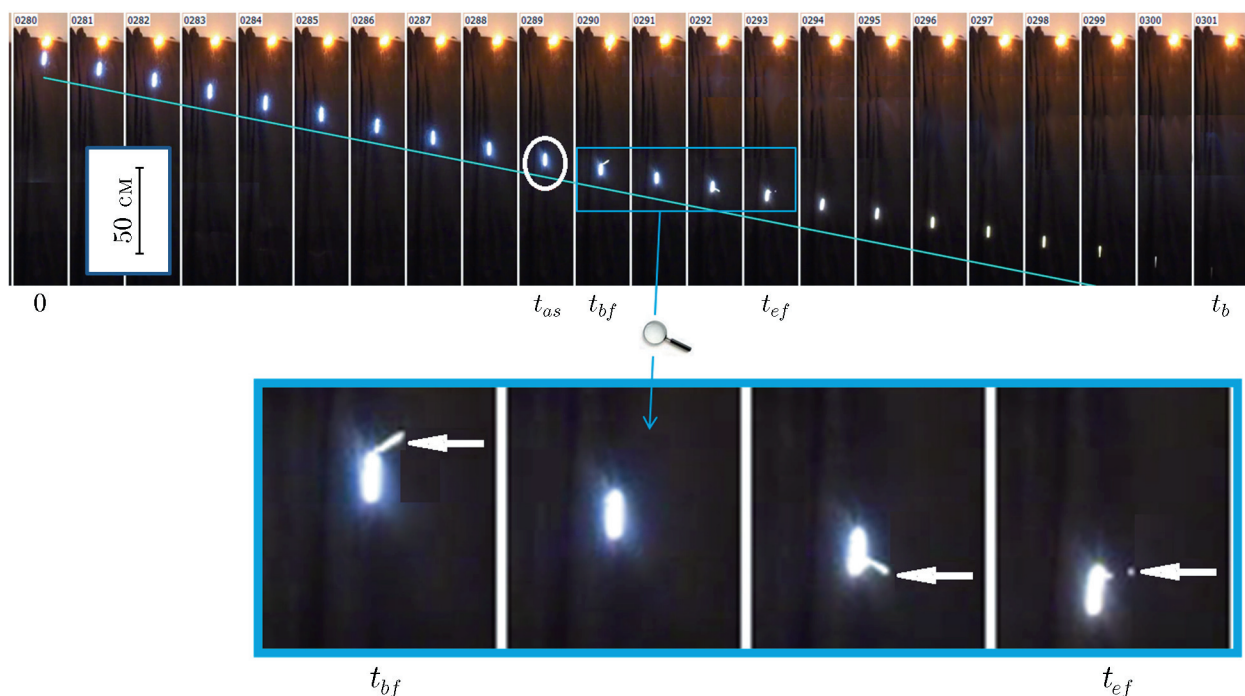


Рис. 1. Видеограмма движения и горения частицы-агломерата — последовательность кадров со светящимися отрезками, которые соответствуют смещению частицы за время экспозиции кадра ($1/25$ с):

0 — выход частицы из образца, первый кадр, на котором вне факела образца появилась частица (факел горения образца виден вверху каждого кадра); t_{as} — время начала стадии асимметричного горения, регистрируется по торможению частицы, положение частицы обведено овалом, наклонная прямая — соответствует невозмущенному движению, из-за торможения после интервала t_{as} светящиеся отрезки отклоняются от нее вверх; t_{bf} — начало фрагментации, виден выброс первого фрагмента; t_{ef} — конец фрагментации, последний кадр с видимыми фрагментами; t_b — конец горения, последний кадр, на котором светящаяся частица еще видна

движения. Типично это заметные искривления треков, либо торможение горящего агломерата, либо (очень редко) его ускорение. Аномалии движения связаны с асимметрией процесса горения, которая развивается вследствие увеличения объема оксидного колпачка, покрывающего часть поверхности частицы [26]. Пока колпачок невелик, картина горения частицы практически симметрична. Когда колпачок становится достаточно большим, начинается стадия асимметричного горения. Пламя вокруг частицы приобретает асимметричную форму. Зачастую наблюдаются выбросы струй и мелких частиц из-под колпачка, что приводит к вращению частицы и появлению характерного спирального или мерцающего трека [12, 26–28]. Частота вращения частиц связана с их диаметром [29, 30]. Важно подчеркнуть, что асимметрия является атрибутивным свойством самого процесса горения и не связана с воздействием конвективных потоков, обтекающих частицу [26, 31, 32]. Следуя [26, 27, 33, 34], будем использовать термин «время начала стадии асимметричного горения» t_{as} . Соответственно, стадия симметричного горения характеризуется интервалом времени $0 \div t_{as}$. На практике момент времени t_{as} определяется либо по торможению частицы, либо по искривлению трека, что иллюстрируется рис. 1 и 2. Как видно на этих рисунках, кадр с выбросом фрагмента не всегда совпадает с кадром, где заметно искривление траектории или начинается торможение частицы. Заметим, что выброс фрагмента в направлении от наблюдателя может быть скрыт за треком. Искривление трека в плос-

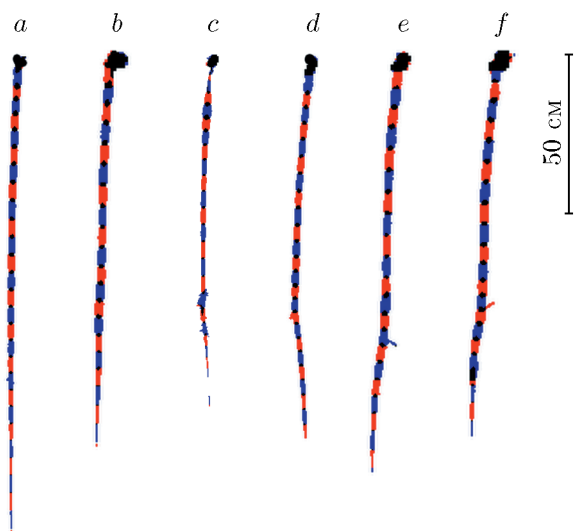


Рис. 2. Типичные варианты треков горящих алюминиевых агломератов:

треки смонтированы из последовательных кадров видеозаписи с помощью компьютерной программы авторов; утолщение вверху каждого трека — факел образца; *a, b* — примеры невозмущенных треков, *c–f* — искривленных, момент искривления трека соответствует началу стадии асимметричного горения t_{as} , на всех треках заметны выбросы фрагментов

кости, проходящей через точку зрения наблюдателя и траекторию падения, также будет незаметно для наблюдателя. Торможение частицы легко объяснить из геометрических соображений. Появление у вектора скорости частицы горизонтальной составляющей вследствие выброса массы приводит к уменьшению проекции вектора на вертикальную ось (траекторию) даже при сохранении модуля вектора скорости.

Экспериментальные значения t_{as}/t_b (86 шт.) для частиц алюминия в диапазоне размеров $D_{Al} = 214 \div 838$ мкм осреднены: $t_{as}/t_b = 0.46$, стандартное отклонение среднего $Se = 0.01$ [35–37]. Относительная погрешность величины t_{as}/t_b , оцененная по формуле для погрешности частного от деления из [36], составляет $10 \div 20$ %, так что в итоге $t_{as}/t_b = 0.46 \pm 0.09$ (округленно 0.5 ± 0.1). Заметим, что в [34] для частиц с $D_{Al} = 90$ мкм в таких же условиях (воздух при атмосферном давлении) получено $t_{as}/t_b = 0.6$, что вполне согласуется с нашими данными.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О ДВИЖЕНИИ ЧАСТИЦ

Для количественного описания движения горящих частиц проводили покадровую обработку видеозаписей и определяли положение частиц. Эмпирические зависимости координаты частицы x и ее скорости v от времени t условно называем траекториями. Траектории осредняли по выборкам близких по размерам частиц, как описано в [38]. Осредненные траектории аппроксимировали кубическими полиномами $x(t)$ и $v(t)$ в двух вариантах. В первом варианте аппроксимацию проводили по всей траектории — от момента выхода частицы из образца до момента окончания горения t_b , не обращая внимания на возмущения траектории. Этот вариант предназначен для получения аппроксимирующих полиномов, используя которые в инженерных задачах можно с приемлемой точностью вычислить координату и скорость частицы в произвольный момент времени. Во втором варианте полиномиальной аппроксимации подвергали эмпирические зависимости $x(t)$ и $v(t)$, ограниченные моментом времени t_{as} , т. е. для стадии симметричного горения (для невозмущенного участка траектории). Оба варианта затем использовали для оценки коэффициента аэродинамического сопротивления горящих частиц C_d .

Было количественно охарактеризовано 79 траекторий падения в воздухе горящих агломератов алюминия диаметром $229 \div 806$ мкм. Путем пиксельных измерений положения частицы на каждом кадре видеogramм, как описано в [20, 39, 40], получена зависимость $x(t)$. Координата x отсчитывается от трубки-держателя образца вниз. Мгновенная

скорость вычисляется как $v(t) = \Delta x / \Delta t$, где Δx — смещение частицы (разность значений координаты на соседних кадрах), Δt — длительность кадра. Полиномы $v(t)$ получали путем аппроксимации осредненных эмпирических зависимостей $v(t)$. Диапазоны времени и координат в обрабатываемых экспериментах составляют $0 \div 1.4$ с и $0 \div 275$ см, скорость частиц изменяется в диапазоне $90 \div 260$ см/с. Точность определения времени — $1/25$ с, типичный масштаб изображения на кадрах — 1 пиксель = 0.5 см, так что координата частицы регистрируется с погрешностью около 1 см. Отличие скоростей частицы на соседних кадрах может достигать ± 11 см/с и обусловлено численным дифференцированием координаты, измеряемой с погрешностью ± 1 пиксель. Значение ± 11 см/с можно расценивать как погрешность определения скорости частицы. Все обработки проведены в программе OriginPro [41], подробности с указанием использованных процедур изложены в [38]. В ходе обработки из массива данных делали выборки частиц со сравнительно близкими размерами (например, выборка в 11 частиц диаметром $540 \div 560$ мкм) и использовали их для осреднения.

Опишем качественные особенности движения горящих частиц-агломератов алюминия в наших экспериментах. Координата частицы монотонно возрастает, более интересно поведение скорости. Агломераты вылетают из образца вниз (по вектору силы тяжести) с некоторой начальной скоростью. Зародыши агломератов в образце до опыта помещены в лунки, и поэтому при прохождении волны горения они «выстреливаются». На рис. 3 представлены данные о начальной скорости частиц в зависимости от их размера. Внутри каждой выборки скорости и размеры осреднены. На рис. 4 представлены скорости частиц из нескольких выборок, обозначаемых строкой следующего вида: $D_{min} \div D_{max}$ (D_{mean}), где D_{min} и D_{max} — граничные размеры для выборки, D_{mean} — средний арифметический диаметр частиц в выборке.

Как видно на рис. 3, начальная скорость агломератов варьируется от 93 до 140 см/с и в среднем составляет $v_0 = 109 \pm 11$ см/с. Вообще говоря, начальная скорость тем меньше, чем крупнее частица. Линейная аппроксимация крайних левых точек полиномиальных кривых $v_0(t)$ для всех выборок, семь из которых показаны на рис. 4, дает зависимость $v_0(D) = 144 - 0.041D$. Здесь v_0 в [см/с], D в [мкм]. Отметим, что приведенные значения начальной скорости характеризуют по большей части конкретную экспериментальную постановку.

Обратимся к рис. 4. Предваряя анализ, отметим, что пилообразный вид эмпирических зависимостей обусловлен численным дифференцированием пиксельной координаты

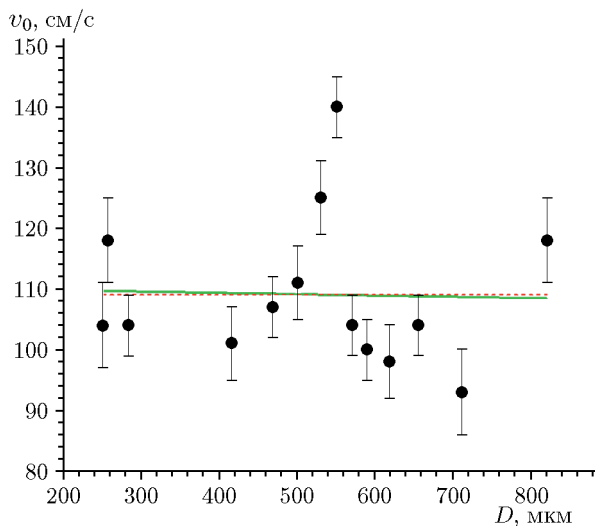


Рис. 3. Размер частиц и их начальная скорость вылета:

сплошная линия — линейная аппроксимация данных, пунктирная линия — среднее значение по всему набору данных $v_0 = 109$ см/с

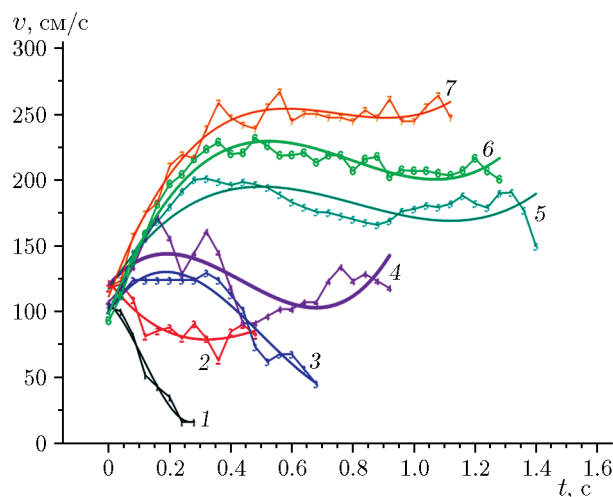


Рис. 4. Зависимость скорости частиц от времени в различных выборках:

ломаные линии с точками — осредненные по выборкам экспериментальные данные, плавные сплошные линии — аппроксимация данных полиномом третьей степени во всем диапазоне времени наблюдения частицы; выборки: 1 — $230 \div 255$ (251) мкм; 2 — $255 \div 260$ (257); 3 — $390 \div 480$ (416); 4 — $468 \div 468$ (468); 5 — $600 \div 630$ (619); 6 — $700 \div 720$ (712); 7 — $800 \div 840$ (821) мкм

частицы, измеряемой с погрешностью. В общем случае начальная скорость в течение $0.2 \div 0.3$ с снижается из-за сопротивления воздуха, затем агломерат начинает ускоряться под действием силы тяжести. При этом для сравнительно небольших частиц, как, например, в выборке 1 ($230 \div 255$ мкм), наблюдается только стадия торможения частицы, в течение которой частица успевает закончить горение. Для выборок более крупных частиц наблюдается достижение установившейся скорости витания. Причем для выборки 2 ($255 \div 260$ мкм) приближение к скорости витания происходит сверху, а в остальных случаях (выборки 3–7) — снизу. То есть в выборке 2 начальная скорость частиц была больше скорости витания, и частицы выходят на эту скорость замедляясь. В выборках 3–7 частицы достигают скорости витания, ускоряясь под действием силы тяжести. Движение частиц примерно со скоростью витания продолжается некоторое время, затем скорость частицы начинает снижаться. Это обусловлено уменьшением массы частицы в процессе горения. Рост оксидного колпачка на частице не компенсирует потерю массы вследствие испарения алюминия [18]. Наблюдаемое увеличение скорости движения частиц ближе к концу горения, вероятно, обусловлено возрастанием плотности частиц за счет накопления оксида и увеличения колпачка. Сложный характер движения крупных частиц-агломератов связан с динамикой изменения их массы вследствие расходования металла и накопления оксида. Для сравнения укажем, что в экспериментах [42] для частиц диаметром 165 мкм, рожденных в электрической микродуге, вид зависимости скорости от времени качественно подобен нашему для выборок 1 и 2 на рис. 4. Частицы в [42] стартовали со скоростью 230 см/с и примерно за 0.05 с тормозились до установившейся скорости около 20 см/с.

Эмпирическая динамика частиц в проведенных экспериментах представлена в виде аппроксимирующих полиномов $x(t)$ и $v(t)$ в двух вариантах — для всей траектории и для ее невозмущенного участка. Эти данные можно получить у авторов по запросу и использовать для оценок координаты и скорости частиц заданного размера в диапазоне $215 \div 840$ мкм в любой момент времени.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦЫ АЛЮМИНИЯ

Для аналитического описания движения горячей частицы необходимо знать величину вязкости воздуха в окрестности частицы. Вязкость зависит от температуры, поэтому встает вопрос о значении температуры. Один из часто применяемых в литературе подходов — использование так называемой «пленочной» температуры, средней между температурой частицы и окружающей среды [43]. Такой подход мы применяли в [38] для частиц титана.

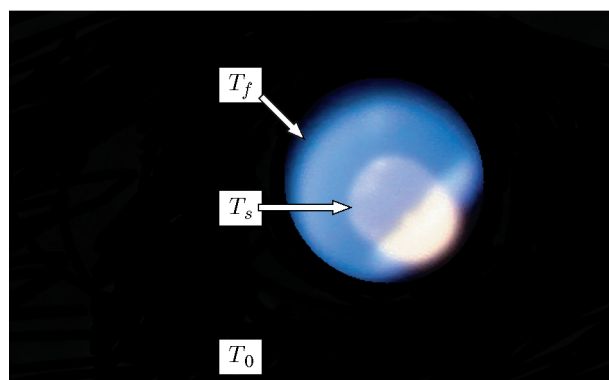


Рис. 5. Вид горящей частицы алюминия в воздухе (фотография В. Н. Симоненко) и локализация характерных температур в ореоле T_f , на поверхности T_s и вдали от частицы T_0

Таблица 1
Температура горения частиц алюминия в воздухе

T_s , К	T_f , К	D , мкм	Источник	Метод
$2523 \div 2573$	—	$500 \div 3000$	[48]	Pyр
$2923 \div 2973$ $2623 \div 2773$	—	165	[42, 32]	Pyр
2640	—	$0.4 \div 20$	[49]	Pyр
2600	—	50	[47] ¹⁾	Pyр
2500	—	$50 \div 200$ ²⁾	[12]	PLIF
2350	3800 ³⁾	215	[50]	PLIF
$2900 \div 3300$ $1800 \div 2300$	—	Слой ⁴⁾	[51]	NIR
$2600 \div 2950$	3080	Слой ⁴⁾	[51]	UV/Vis
2483	3232	← Осредненные значения		

Примечания. ¹⁾ Среда O_2/Ar . ²⁾ Агломераты — продукты горения композита $Al-KClO_4$, изготовленного с применением аддитивной технологии. ³⁾ В зоне максимальной концентрации Al_2O_3 . ⁴⁾ Частицы микрометровых размеров в слое насыпной плотности.

Однако в случае алюминия следует говорить о трех температурах — окружающей среды на бесконечности T_0 , поверхности частицы T_s и пламени частицы T_f (рис. 5).

В проведенных экспериментах частицы горят в воздухе, поэтому $T_0 = 300$ К. В качестве оценки температуры поверхности частицы традиционно [1, 44] принимают температуру кипения Al при соответствующем давлении. Согласно справочнику [45], в нашем случае при 1 атм Al кипит при 2793 К. Результаты измерений «температуры горения», выполненных разными авторами, приведены в табл. 1. Типичные методы измерения — пирометрия (яркостная, двух- или трехцветная [46], в таблице пометка Pyр), спектроскопия (ближняя инфракрасная — NIR, ультрафиолетовая и видимого света — UV/Vis), лазерно-индуцированная флуоресценция (PLIF). Следуя [47], погрешность измерений можно оценить величиной ± 50 К.

Как видно, измеренные значения T_s ниже температуры кипения Al . Расчетная адиа-

батическая температура горения алюминия в кислороде может превышать 4000 К, измеренные значения обычно лежат в диапазоне $3\,100 \div 3\,300$ К. Формально осредняя данные табл. 1, получаем $T_s = 2\,483$ К и $T_f = 3\,232$ К, условно это температура на поверхности частицы и в ореоле. Согласно [45] температура плавления оксида Al_2O_3 равна 2320 К (ниже T_f), а кипения — 3 253 К (близка к T_f). Продолжая формальное осреднение, температуру в окрестности частицы примем равной $(T_0 + T_s + T_f)/3 = 2\,005$ К. Для нахождения значений плотности ρ_g и динамической вязкости воздуха μ при этой температуре воспользуемся формулами из [52]:

$$\rho_g = -2.825 \cdot 10^{-3} + 348/T - 346/T^2, \quad (1)$$

$$\mu = (4.031 + 0.0551T - 2.2 \cdot 10^{-5}T^2 + 5.43 \cdot 10^{-9}T^3) \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

Формулы применимы в диапазоне температур $T = 270 \div 2\,000$ К при давлении 0.1 МПа. Полученные значения $\rho_g = 0.1707$ кг/м³ и $\mu = 6.98 \cdot 10^{-5}$ Па · с используем в аналитических расчетах.

КОЭФФИЦИЕНТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРЯЩИХ ЧАСТИЦ

В соответствии с методологией [38] аппроксимирующие полиномы $x(t)$ и $v(t)$ сопоставляли с аналитическим решением задачи о движении сферической частицы под действием сил тяжести и Стокса. Силами Архимеда, Магнуса, Бассэ и Саффмана [53] пренебрегали. Используя в аналитическом решении зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления C_d от числа Рейнольдса Re в форме $C_d(\text{Re}) = A/\text{Re}$, константу A варьировали с шагом 1 и подбирали значение, обеспечивающее близость расчетных зависимостей $x(t)$ и $v(t)$ к эмпирическим полиномам в соответствии с заданным критерием. Подгонку параметра A выполняли отдельно для координаты $x(t)$ и для скорости $v(t)$ в двух вариантах — по всей траектории и для невозмущенного участка траектории, т. е. для стадии симметричного горения, ограниченной временем t_{as} . Во всех случаях отклонение аналитических кривых $x(t)$ и $v(t)$ от эмпирических полиномов было меньше, чем разброс (отличие) эмпирических зависимостей от частицы к частице в пределах выборки. Полученные результаты представлены в табл. 2. Здесь n — количество осредненных траекторий, Re_{min} и Re_{max} — предельные значения числа Рейнольдса $\text{Re} = (\rho_g v D)/\mu$ на траектории. Значение Re_{min} рассчитано для левой границы заданного интервала размеров частиц и минимальной скорости частицы, значение Re_{max} — для правой границы интервала размеров и максимальной скорости частицы.

Глобальное среднее значение $A = 77 \pm 3$ для чисел Рейнольдса $0.2 < \text{Re} < 5.2$ и частиц диаметром $230 \div 840$ мкм. Соответственно, для проведенных экспериментов $C_d = 77/\text{Re}$. Как видно из табл. 2, значение A зависит от размера частиц и сравнительно слабо подвержено влиянию процедуры обработки (по координате или по скорости, по полной траектории или по ее невозмущенному участку).

Предложенную зависимость $C_d(\text{Re}) = 77/\text{Re}$ можно встраивать в расчетные блоки, моделирующие горение и движение частиц в технических устройствах. Поскольку обработке подвергнуты данные, соответствующие конкретным экспериментальным условиям, возможность применения полученных закономерностей для иных условий следует дополнительно проверять. Однако, вследствие слабой изученности закономерностей движения горящих частиц вообще и агломератов алюминия в частности, применение упрощенных подходов вполне оправдано как первое приближение. Конечно, они не заменяют более сложных расчетов, учитывающих динамику накопления оксида, поворот частицы в полете, диспергирование и асимметрию оттока массы паров алюминия и множество других процессов и явлений, происходящих при горении частиц [54–57].

Таблица 2

Параметр A в выражении коэффициента аэродинамического сопротивления
горящих частиц в форме $C_d = A/Re$

Размеры, мкм (среднее значение)	Количество осредненных траекторий	Re _{min}	Re _{max}	Время, с	А	
					по координате	по скорости
Аппроксимация полной траектории						
230 ÷ 255 (251)	3	0.191	0.743	0 ÷ 0.28	45	60
255 ÷ 260 (257)	3	0.42	0.838	0 ÷ 0.48	43	45
260 ÷ 390 (283)	4	0.751	0.955	0 ÷ 0.88	33	35
407	1	0.75	1.537	0 ÷ 0.68	88	100
390 ÷ 480 (416)	2	0.463	1.319	0 ÷ 0.68	75	100
468	1	1.173	1.641	0 ÷ 0.92	85	96
480 ÷ 520 (501)	3	1.53	2.872	0 ÷ 1.24	70	65
520 ÷ 540 (530)	6	1.428	2.736	0 ÷ 1.2	80	82
540 ÷ 560 (551)	11	0.229	2.153	0 ÷ 1.16	92	110
560 ÷ 580 (571)	10	1.633	2.635	0 ÷ 1.04	85	100
580 ÷ 600 (590)	8	1.387	2.805	0 ÷ 1.24	71	75
600 ÷ 630 (619)	11	1.673	3.066	0 ÷ 1.4	100	110
630 ÷ 700 (656)	8	1.795	3.404	0 ÷ 1.32	100	112
700 ÷ 720 (712)	6	1.629	3.976	0 ÷ 1.32	115	120
800 ÷ 840 (821)	2	2.225	5.189	0 ÷ 1.12	130	135
Общий диапазон 230 ÷ 840 мкм		Общий диапазон Re = 0.2 ÷ 5.2			Среднее 81 ± 7	Среднее 90 ± 7
					Среднее 85 ± 5	
Аппроксимация невозмущенного участка траектории						
230 ÷ 255 (251)	3	0.327	0.727	0 ÷ 0.12	45	60
255 ÷ 260 (257)	3	0.567	0.894	0 ÷ 0.2	33	41
260 ÷ 390 (283)	4	0.98	1.041	0 ÷ 0.32	31	28
407	1	0.97	1.499	0 ÷ 0.28	36	79
390 ÷ 480 (416)	2	1.031	1.272	0 ÷ 0.36	68	70
468	1	1.19	1.779	0 ÷ 0.4	65	75
480 ÷ 520 (501)	3	1.369	2.564	0 ÷ 0.36	64	53
520 ÷ 540 (530)	6	1.103	2.274	0 ÷ 0.36	64	67
540 ÷ 560 (551)	11	1.827	2.419	0 ÷ 0.36	91	88
560 ÷ 580 (571)	10	1.439	2.664	0 ÷ 0.28	50	65

Таблица 2 (окончание)

Размеры, мкм (средние)	Количество осредненных траекторий	Re_{min}	Re_{max}	Время, с	А	
					по координате	по скорости
580 ÷ 600 (590)	8	1.425	2.856	0 ÷ 0.36	71	75
600 ÷ 630 (619)	11	1.493	3.972	0 ÷ 0.44	82	65
630 ÷ 700 (656)	8	1.639	3.419	0 ÷ 0.6	90	93
700 ÷ 720 (712)	6	1.567	3.944	0 ÷ 0.36	90	90
800 ÷ 840 (821)	2	2.304	4.957	0 ÷ 0.44	123	120
Общий диапазон 230 ÷ 840 мкм		Общий диапазон $Re = 0.3 \div 5$			Среднее 67 ± 7	Среднее 71 ± 6
					Среднее 69 ± 4	

Примечание. Число после знака $\pm$ есть стандартное отклонение среднего Se [36].

Представляет интерес сравнить полученную зависимость $C_d = 77/Re$ с другими формулами, применяемыми при расчетах движения горящих частиц. Подборка таких формул дана в табл. 3. Следует отметить, что мы не имели целью собрать все подобные зависимости, а лишь хотели посмотреть, как соотносятся друг с другом формулы, чаще других используемые в расчетах движения горящих частиц. Если в оригинальных работах рассматривались конкретные частицы, то их материал указан в табл. 3. Если формулы получены путем теоретического моделирования, то материал частиц не указан. Здесь уместно упомянуть работы [17, 53, 58–62], содержащие обзоры и сравнения различных формул для C_d . В общем случае сила сопротивления зависит от чисел Рейнольдса, Мортонна, Акривоса, Вебера, а формулы могут включать в себя также числа Кнудсена, Маха, температуры газа и частиц и другие параметры. Автор [61] рассмотрел несколько десятков формул для расчета C_d и пришел к заключению, что выбор наилучшей формулы определяется следующими факторами.

1. Характер процессов в дисперсной среде. Если в потоке происходит непрерывное изменение размеров частиц за счет процессов коагуляции и дробления частиц, а также других физических процессов (испарение, растворение, конденсация и т. д.), то следует выбрать формулы, соответствующие большой области изменения числа Re . Для малой области значений числа Re можно использовать простые формулы, такие как формула 11 Клячко — Мазина или формула 12 в табл. 3.
2. Область изменения чисел подобия и погрешность формул. Относительная погрешность большинства формул в табл. 3 в заданной области чисел Re не превышает 10 %, однако даже при небольшом выходе числа Re из заданного диапазона формулы дают ощутимые ошибки.
3. Форма и размеры частиц.

Прокомментируем эти заключения [61]. Процесс горения, очевидно, сопровождается изменением массы и размеров частиц. Вместе с тем, в наших экспериментах число Re варьируется в сравнительно узком диапазоне $0.2 < Re < 5.2$. Это отчасти обусловлено характерной особенностью горения алюминия — накоплением оксида на горячей частице, в результате чего массы и размеры начальной алюминиевой и финальной оксидной частиц сопоставимы [18]. Указанная особенность оправдывает использование простой формулы

Таблица 3

Формулы для коэффициента аэродинамического сопротивления частиц

№ п/п	Формула	Re	D, мкм	Материал	Источ- ник
1	$C_d = 61/\text{Re}$	$1 \div 10$	$200 \div 550$	Ti	[38]
2	$C_d = 45/\text{Re}$	$7 \div 9$	$400 \div 540$	Al	[63]
3	$C_d = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{3}{16}\text{Re}\right)$	$0 \div 1$	$0 \div 5000$	—	[64]
4	$C_d = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.15\text{Re}^{0.687})$	$0 \div 300$ $1 \div 1000$	$1 \div 100$ $30 \div 80$	Al, B Al	[65–68]
5	$C_d = 24/\text{Re} + 4.5$	$0 \div 300$	$1 \div 100$	Al	[58]
6	$C_d = 53/\text{Re}$	$7.5 \div 8.5$	$100 \div 1000$	Уголь	[69]
7a	$C_d = a_1 + a_2/\text{Re} + a_3/\text{Re}^2$	$0 \div 5000^{1)}$			
	$C_d = 3.69 + 22.73/\text{Re} + 0.0903/\text{Re}^2$	$0.1 < \text{Re} < 1$	$5 \div 100$	Ti; капли ²⁾	[70–72]
7b	$C_d = 1.222 + 29.1667/\text{Re} - 3.8889/\text{Re}^2$	$1 < \text{Re} < 10$	$40 \div 100$		
8	$C_d = 72/\text{Re}$	$0.1 \div 3.5$	$36 \div 1300$	Al, Mg, Ti ³⁾	[73]
9	$C_d = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + 0.15\text{Re}^{0.687} + \frac{0.0175\text{Re}}{1 + 42500\text{Re}^{-1.16}}\right)$	$0 \div 2 \cdot 10^5$	$1 \div 10$	—	[74]
10a	$C_d = 24\text{Re}^{-1}, \text{Re} \leq 2$	$0 \div 2$	$1 \div 10$	—	[74]
10b	$C_d = 18.5\text{Re}^{-0.6}, 2 < \text{Re} \leq 500$	$2 \div 500$			
11	$C_d = \frac{24}{\text{Re}} (1 + 0.17\text{Re}^{2/3})$	$0 \div 1000$ [75] $\text{Re} \leq 500$ [61]	$10 \div 50$	—	[75, 61]
12a	$C_d = 24/\text{Re}$	$\text{Re} < 0.1$			
12b	$C_d = 26.9/\text{Re}^{0.95}$	$0.1 \div 1$	$1 \div 200^{4)}$	—	[61]
12c	$C_d = 26.5/\text{Re}^{0.8}$	$1 \div 10$			
13	$C_d = \frac{24}{\text{Re}} \left(1 + \frac{\text{Re}^{8/3}}{5 + 6.5\text{Re}^2}\right)$	$0.01 \div 800$	$1 \div 200^{4)}$	—	[61]
14	$C_d = \frac{21}{\text{Re}} + \frac{6}{\sqrt{\text{Re}}} + 0.28$	$0.1 \div 4 \cdot 10^3$	$1 \div 200^{4)}$	—	[76]
15	$C_d = 24/\text{Re} + 4/\text{Re}^{1/3}$	$1 \div 1000$	$1 \div 200^{4)}$	Уголь; капли углеводородов	[77, 78]
16	$C_d = 77/\text{Re}$	$0.2 \div 5.2$	$230 \div 840$	Al	Данная работа

Примечания. ¹⁾ Значения констант a_1, a_2, a_3 приведены в [70, 71] для восьми интервалов чисел Re, охватывающих диапазон $0 \div 50000$. Здесь представлены лишь два выражения, перекрывающие диапазон $0.1 < \text{Re} < 10$. ²⁾ Капли суспензионного топлива на основе керосина и частиц бора. ³⁾ Авторы [73] использовали эффективный размер облака дочерних частиц-продуктов вместо диаметра материнской частицы. Эффективный размер облака втрое больше диаметра материнской частицы, так что фактически они увеличили C_d в три раза. Подобным образом авторы расчетной работы [79] увеличили C_d в 2.5 раза после воспламенения агломератов. ⁴⁾ Условный размер.

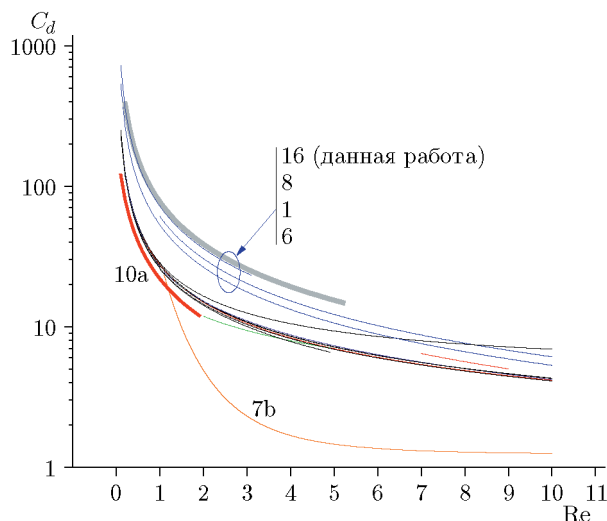


Рис. 6. Зависимости $C_d(Re)$, вычисленные по формулам из табл. 3 (номера формул указаны около кривых)

вида $C_d = A/Re$ для расчета силы сопротивления. Касательно формы и размера частиц, в нашем случае частицы можно считать сферическими, слабо деформирующимися, с диаметром, равным исходному (до горения).

На рис. 6 показаны зависимости $C_d(Re)$, вычисленные по формулам из табл. 3. Вычисления проведены в диапазоне чисел Re , соответствующем пересечению интервала $0.1 < Re < 10$ (расширенного по сравнению с нашими экспериментами) и интервала применимости формул 1–16 из табл. 3, как он указан в оригинальных работах. Как видно, относительно большие различия имеют место для чисел $Re < 5$. Некоторые кривые на рис. 6 помечены. А именно, толстая кривая 10a соответствует закону Стокса $C_d = 24/Re$. Часто встречающаяся в статьях кривая 7b Морси — Александра расположена ниже всех, т. е. дает наименьшую силу сопротивления. Напротив, выше других лежит кривая 16, соответствующая настоящей работе. Под ней располагаются кривые 8, 1, 6. Все остальные зависимости из табл. 3 практически совпадают и находятся в пучке без метки, расположенном между кривыми 10a и 6. Кривые 16, 8, 1, 6 получены не в модельных расчетах, а в результате обработки реальных экспериментов со сравнительно крупными ($100 \div 1\,300$ мкм) горящими частицами различной природы (Al, Mg, Ti, C). Таким образом, процесс горения в разы увеличивает коэффициент аэродинамического сопротивления частиц независимо от механизма горения (гетерогенный, парофазный) и преимущественного направления потока массы (к частице или от нее). Другие гидродинамические эффекты, рассматриваемые при выводе модельных формул для C_d , оказываются малозначимыми. Вероятно, увеличение C_d обусловлено наличием высокотемпературной зоны в окрестности горящей частицы. Важно подчеркнуть, что большинство часто используемых в литературе формул не отражают указанной особенности (увеличение эффективного коэффициента C_d). Для горящих частиц Mg, Ti, B, C при $Re < 5$ следует использовать простые эмпирические формулы вида $C_d = A/Re$, где A зависит от природы частиц.

Данные табл. 2 представлены на рис. 7 в виде зависимостей параметра A от размера частиц D для разных вариантов подгонки. В качестве размера частиц использован средний размер в выборке D_{mean} . Как видно, во всех вариантах значение параметра A увеличивается с размером частиц. Функцию $A(D)$ можно аппроксимировать линейной зависимостью $A(D) = 9.33 + 0.13D$ ($R^2 = 0.65$). Для сравнения, в случае горения частиц титана сопоставимых размеров величина A почти постоянна на уровне $A \approx 61$ [38]. Причина возникновения зависимости $A(D)$, вероятно, связана с относительным диаметром ореола, окружающего горящий агломерат, и с изменением плотности горящего агломе-

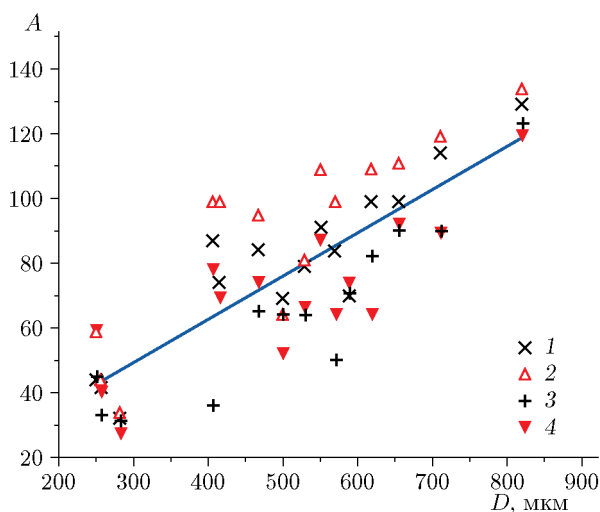


Рис. 7. Параметр A при разных вариантах подгонки (точки) и единая аппроксимирующая зависимость $A(D)$ (линия):

1, 2 — подгонка соответственно по координате и скорости по полной траектории, 3, 4 — подгонка соответственно по координате и скорости по невозмущенному участку траектории

рата при замещении выгорающего алюминия оксидом. Полученную аппроксимирующую зависимость $A(D)$ можно использовать в формуле «уточненного» коэффициента сопротивления в форме $C_d(D, Re) = (9.33 + 0.13D)/Re$, где $230 < D < 840$ мкм и $0.2 < Re < 5.2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано горение и движение крупных алюминиевых агломератов диаметром $215 \div 840$ мкм в свободном падении в воздухе на дистанции $2 \div 3$ м. Определена длительность стадии симметричного горения, которая в среднем составляет 0.5 ± 0.1 по отношению к времени горения. Закономерности движения горящих частиц обобщены в виде эмпирических зависимостей координаты и скорости от времени для частиц разных диаметров. Путем сопоставления расчетных и экспериментальных зависимостей оценен коэффициент аэродинамического сопротивления горящих агломератов в малоисследованной области параметров — для больших диаметров частиц D ($215 \div 840$ мкм) и малых чисел Re ($0.2 \div 5.2$). Определена зависимость коэффициента сопротивления горящего агломерата от диаметра в форме $C_d(D, Re) = (9.33 + 0.13D)/Re$. Для проведения аналитических расчетов движения горящих частиц в воздухе при атмосферном давлении рекомендуется использовать эту формулу или упрощенную формулу $C_d = 77/Re$ и значение вязкости воздуха $6.98 \cdot 10^{-5}$ Па · с. Для расчетов движения в других условиях следует скорректировать значения плотности и вязкости газа в соответствии с температурой и давлением. Сравнение различных зависимостей для $C_d(D, Re)$, встречающихся в литературе, показало, что и для горящих частиц Mg, Ti, C, B при $Re < 5$ следует отдать предпочтение простым эмпирическим формулам вида $C_d = A/Re$, где A зависит от природы частиц.

Определенные в работе закономерности движения и длительность стадии симметричного горения t_{as} можно использовать для валидации моделей горения.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

У авторов статьи по запросу по указанным адресам электронной почты можно получить формулы полиномов, описывающих координату $x(t)$ и скорость частиц $v(t)$ для 15 выборок в диапазоне диаметров $230 \div 840$ мкм.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания (FWGF-2021-0001) Институту химической кинетики и горения СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.
2. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах. — 2-е изд. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
3. Крюков А. Ю. Адаптация внутрикамерных процессов и элементов конструкции энергоустановок на порошковом горючем к технологиям получения ультра- и нанодисперсных материалов. — Пермь: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, 2012.
4. Полетаев Н. И., Золотко А. Н., Дорошенко Ю. А. Дисперсность продуктов сгорания металлов в ламинарном пылевом факеле // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 30–44. — EDN: NUCWMF.
5. Glotov O. G., Zarko V. E. Formation of Nanosized Products in Combustion of Metal Particles // *Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application*. — Elsevier, 2016. — Ch. 11. — P. 285–321. — DOI: 10.1016/B978-0-12-802710-3.00011-8.
6. Axelbaum R. L., Lottes C. R., Huertas J. I., Rosen L. J. Gas-phase combustion synthesis of aluminum nitride powder // *Symp. (Int.) on Combust.* — 1996. — V. 26, N 2. — P. 1891–1897. — DOI: 10.1016/S0082-0784(96)80011-7.
7. Шидловский А. А. Основы пиротехники. — М.: Машиностроение, 1973.
8. Вспомогательные системы ракетно-космической техники: сб. ст. / под ред. И. В. Тишунина. — М.: Мир, 1970.
9. Руге Ю. Техника сварки: справочник в 2 ч. — М.: Металлургия, 1984.
10. Хуан Х. Т., Цзоу М. Ш., Го С. Я., Ян Ж. Ц., Ли Ю. К. Эффективность реагирования алюминия в составе топлива для прямоточных гидрореактивных двигателей // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 5. — С. 39–48. — EDN: RBUETX.
11. Энергетические конденсированные системы: краткий энцикл. словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 2000.
12. Wang Y., Hagen E., Biswas P., Wang H., Zachariah M. R. Imaging the combustion characteristics of Al, B, and Ti composites // *Combust. Flame*. — 2023. — V. 252. — 112747. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.112747.
13. Aitov N. L., Zeigarnik V. A., Novikov V. A., Okunev V. I. Development of powder-like metallized fuels for pulsed geophysical MHD generators // *Proc. of the 2nd Beijing Int. Symp. on Pyrotechnics and Explosives combined with the 17th Int. Pyrotechnics Seminar*. — Beijing, 1997. — P. 316–319.
14. Bazyn T., Krier H., Glumac N. Combustion of nanoaluminum at elevated pressure and temperature behind reflected shock waves // *Combust. Flame*. — 2006. — V. 145, N 4. — P. 703–713. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.12.017.
15. Бойко В. М., Лотов В. В., Папырин А. Н. Воспламенение газовзвесей металлических порошков в отраженных УВ // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 2. — С. 67–74.
16. Яновский Л. С., Лемперт Д. Б., Разносчиков В. В., Аверьков И. С., Шаров М. С. Оценка эффективности некоторых металлов и неметаллов в твердых топливах для ракетно-прямоточных двигателей // Физика горения и взрыва. — 2020. — Т. 56, № 1. — С. 81–94. — DOI: 10.15372/FGV20200109. — EDN: ZGYFSQ.

17. **Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М.** Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. — М.: Физматлит, 2010.
18. **Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С.** Горение крупных частиц-агломератов алюминия в воздухе. I. Методика исследования, время горения и финальные оксидные частицы // Физика горения и взрыва. — 2025. — Т. 61, № 1. — С. 44–59. — DOI: 10.15372/FGV2023.9367. — EDN: CFVDEM.
19. **Glotov O. G.** Method of Model Agglomerates and its Application to Study the Combustion Mechanisms of Al, Al + B, and Ti Particles // Innovative Energetic Materials: Properties, Combustion Performance and Application. — Singapore: Springer, 2020. — P. 405–455. — DOI: 10.1007/978-981-15-4831-4_14.
20. **Глотов О. Г., Суродин Г. С.** Горение свободно падающих в воздухе агломератов из алюминия и бора. I. Экспериментальный подход // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 3. — С. 100–109. — DOI: 10.15372/FGV20190311. — EDN: YPHAWL.
21. **Горбенко Т. И.** Регулирование энергетических характеристик топлив на основе нитрата аммония // Вестн. Сиб. гос. аэрокосм. ун-та им. акад. М. Ф. Решетнева. — 2009. — № 2. — С. 173–178. — EDN: KUNJQH.
22. **Архипов В. А., Горбенко Т. И., Жуков А. С., Пестерев А. В.** Влияние хлорида олова на скорость горения гетерогенных конденсированных систем // Хим. физика и мезоскопия. — 2011. — Т. 13, № 4. — С. 463–469. — EDN: PJLVRV.
23. **Кижняев В. Н., Голобокова Т. В., Покатилов Ф. А., Верещагин Л. И., Эстрин Я. И.** Синтез энергоемких триазол- и тетразолсодержащих олигомеров и полимеров (обзор) // Химия гетероцикл. соединений. — 2017. — Т. 53, № 6-7. — С. 682–692.
24. **Глотов О. Г.** Горение сферических титановых агломератов в воздухе. II. Результаты // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 58–71. — EDN: QASQQN.
25. **Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С.** Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. II. Характеристики конденсированных продуктов горения // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 6. — С. 51–65. — DOI: 10.15372/FGV20220605. — EDN: VMYQDG.
26. **Dreizin E. L.** On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // Combust. Flame. — 1999. — V. 117, N 4. — P. 841–850. — DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00125-4.
27. **Braconnier A., Chauveau C., Halter F., Gallier S.** Detailed analysis of combustion process of single aluminum particle in air using an improved experimental approach // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 2018. — V. 17, N 2. — P. 111–124. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2018027988.
28. **Гетерогенное горение:** пер. с англ. / под ред. В. А. Ильинского. — М.: Мир, 1967.
29. **Reshetnikov I., Karasev V. V., Bykovskikh A., Glotov O. G.** Dynamics of generation of nanooxides during the burning of aluminum and titanium microparticles // 8th Eur. Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2019), Madrid, Spain, 2019. — DOI: 10.13009/EUCASS2019-892.
30. **Reshetnikov I. V., Karasev V. V., Valiulin S. V., Glotov O. G., Bykovskikh A. M.** Model of rotation of burning aluminum droplets // Energetic Materials — Past, Present and Future: 50th Int. Annu. Conf. of the Fraunhofer ICT, Karlsruhe, Germany, 2019. — P. 125-1–125-4.
31. **Dreizin E. L.** Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and microgravity // Combust. Flame. — 1999. — V. 116, N 3. — P. 323–333. — DOI: 10.1016/S0010-2180(97)00331-3.
32. **Dreizin E. L.** Experimental study of stages in aluminum particle combustion in air // Combust. Flame. — 1996. — V. 105, N 4. — P. 541–556. — DOI: 10.1016/0010-2180(95)00224-3.

33. **Braconnier A., Gallier S., Halter F., Chauveau C.** Aluminum combustion in CO₂–CO–N₂ mixtures // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 3. — P. 4355–4363. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.06.028.
34. **Braconnier A., Gallier S., Chauveau C., Halter F.** Combustion of a single aluminum droplet burning in O₂/CO₂/N₂ mixtures // 37th Int. Symp. on Combustion, Dublin, Ireland, 2018. — Poster. — hal-01842345v3. — DOI: 10.13140/RG.2.2.17294.20803.
35. **Афифи А., Эйзен С.** Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. — М.: Мир, 1982.
36. **Тейлор Д.** Введение в теорию ошибок. — М.: Мир, 1985.
37. **Новицкий П. В., Зограф И. А.** Оценка погрешности результатов измерений. — Л.: Энергоатомиздат, 1985.
38. **Белоусова Н. С., Глотов О. Г.** Закономерности движения и коэффициент аэродинамического сопротивления крупных горящих частиц титана в воздухе // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2022. — Т. 29, № 4. — С. 587–595. — EDN: DHBEKX.
39. **Глотов О. Г.** Горение сферических титановых агломератов в воздухе. I. Экспериментальный подход // *Физика горения и взрыва*. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 50–57. — EDN: QASQQD.
40. **Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С.** Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. I. Экспериментальные методики, время горения и режимы фрагментации // *Физика горения и взрыва*. — 2021. — Т. 57, № 6. — С. 20–31. — DOI: 10.15372/FGV20210603. — EDN: CFUUON.
41. **OriginPro 2020b.** — OriginLab Corp., Northampton, MA, USA.
42. **Dreizin E. L.** Phase changes in metal combustion // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2000. — V. 26, N 1. — P. 57–78. — DOI: 10.1016/S0360-1285(99)00010-6.
43. **Архипов В. А., Бондарчук С. С., Шеховцов В. В., Волокитин О. Г., Аньшаков А. С., Кузьмин В. И.** Моделирование процесса получения полых частиц кремнезема в плазменном потоке. Часть 1. Динамика движения и нагрева пористых частиц // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2019. — Т. 26, № 1. — С. 147–160. — EDN: BPLRGX.
44. **Бекстед М. В., Лианг У., Паддупаккам К. В.** Математическое моделирование горения одиночной алюминиевой частицы (обзор) // *Физика горения и взрыва*. — 2005. — Т. 41, № 6. — С. 15–33. — EDN: MNQNRA.
45. **Физические величины: справочник** / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
46. **Свет Д. Я.** Объективные методы высокотемпературной пирометрии на непрерывном спектре излучения. — М.: Наука, 1968.
47. **Sarou-Kanian V., Rifflet J. C., Millot F., Gökalp I.** Aluminum combustion in wet and dry CO₂: Consequences for surface reactions // *Combust. Flame*. — 2006. — V. 145, N 1-2. — P. 220–230. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2005.10.014.
48. **Смелков Г. И., Александров А. А., Пехотиков В. А., Гришин Е. В.** Некоторые аспекты горения крупных алюминиевых частиц в воздушном потоке // *Физика горения и взрыва*. — 1978. — Т. 14, № 5. — С. 33–37.
49. **Nie H. Q., Pisharath S., Hng H. H.** Combustion of fluoropolymer coated Al and Al–Mg alloy powders // *Combust. Flame*. — 2020. — V. 220. — P. 394–406. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.07.016.
50. **Bucher P., Yetter R. A., Dryer F. L., Vicenzi E. P., Parr T. P., Hanson-Parr D. M.** Condensed-phase species distributions about Al particles reacting in various oxidizers // *Combust. Flame*. — 1999. — V. 117, N 1-2. — P. 351–361. — DOI: 10.1016/S0010-2180(98)00074-1.

51. **Weiser V., Kelzenberg S., Knapp S., Raab A., Roth E., Schulz O.** Combustion behavior of metal particles as bulk materials under different gases // 7th Workshop on Pyrotechnic Combustion Mechanisms, Rotterdam, NL, 22 Aug., 2009.
52. **Теплофизические свойства воздуха:** база данных по теплофизическим свойствам газов и их смесей, используемых в ЯЭУ / Государственная служба стандартных справочных данных в области использования атомной энергии «Росатом» — НИЯУ МИФИ, 2023 [Электронный ресурс]. — URL: <https://gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/Air.php?ysclid=lj48811jad268377932> (дата обращения: 24.06.2024).
53. **Лугуманов Т. Т., Кулешов В. С.** К моделированию динамики системы флюид — дисперсная среда // Тр. Ин-та механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН. — 2014. — № 10. — С. 66–72. — EDN: WDJTTR.
54. **Бабук В. А.** Горение крупной фракции частиц алюминия в среде продуктов сгорания твердых ракетных топлив // Изв. РАН. — 2013. — № 2 (77). — С. 83–93. — EDN: QJHYJJ.
55. **Волков К. Н.** Гидродинамика капли алюминия с «нашлепкой» окиси в потоке продуктов сгорания твердого топлива // Unsteady Combustion and Interior Ballistics: Lectures of the III Int. Workshop, Saint Petersburg, Russia, 2000. — V. 2. — P. 404–419.
56. **Арсентьева М. В.** Определение коэффициента сопротивления горящих частиц воспламеняющего состава в камере РДТТ // Изв. ТулГУ. Сер. Техн. науки. — 2011. — № 2. — С. 46–50. — EDN: PUITVV.
57. **Emelyanov V. N., Teterina I. V., Volkov K. N.** Dynamics and combustion of single aluminium agglomerate in solid propellant environment // Acta Astronaut. — 2022. — V. 176. — P. 682–694. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.03.046.
58. **Хендерсон Ч. Б.** Коэффициенты сопротивления сферы в течениях разреженного газа и сплошной среды // Ракетная техника и космонавтика. — 1976. — № 6. — С. 5–7.
59. **Федоров А. В., Шульгин А. В., Поплавский С. В.** О движении частицы за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 2. — С. 101–110. — EDN: LMALHN.
60. **Федоров А. В., Хмель Т. А.** Проблемы замыкания моделей при описании детонации ультрадисперсных газозвесей алюминия (обзор) // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 1. — С. 3–20. — DOI: 10.15372/FGV20190101. — EDN: YVPADR.
61. **Келбалиев Г. И.** Коэффициенты сопротивления твердых частиц, капель и пузырей различной формы // Теорет. основы хим. технологии. — 2011. — Т. 45, № 3. — С. 264–283. — EDN: NTVZND.
62. **Глотов О. Г., Зарко В. Е., Карасев В. В.** Проблемы и перспективы изучения образования и эволюции агломератов методом отборов // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 1. — С. 161–172. — EDN: OONSHN.
63. **Glotov O. G., Karasev V. V., Zarko V. E., Fedotova T. D., Beckstead M. W.** Evolution of aluminum agglomerates moving in combustion products of model solid propellant // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 2002. — V. 5, N 1-6. — P. 397–406. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v5.i1-6.430.
64. **Oseen C. W.** Neuere Methoden und Ergebnisse in der Hydrodynamik. — Berlin: Akad. Verl., 1927.
65. **Стернин Л. Е., Шрайбер А. А.** Многофазные течения газа с частицами. — М.: Машиностроение, 1994.
66. **Порязов В. А., Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А.** Математическое моделирование горения пороха Н с добавлением порошка алюминия // Инж.-физ. журн. — 2015. — Т. 88, № 1. — С. 93–101. — EDN: THIVLX.

67. **Порязов В. А., Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Архипов В. А.** Численное моделирование горения смесового твердого топлива, содержащего порошок бора // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 2. — С. 78–87. — DOI: 10.15372/FGV20220209. — EDN: CZYILV.
68. **Decker T. G., Devillers R. W., Gallier S.** New insights into the physics of agglomeration in solid propellants // Aerospace Eur. Conf. 2023 (Joint 10th EUCASS — 9th CEAS), Lausanne, Switzerland, 2023. — <https://hal.science/hal-04206272>.
69. **Бабий В. И., Куваев Ю. Ф.** Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
70. **Tabbara H., Gu S., McCartney D. G.** Computational modelling of titanium particles in warm spray // Comput. Fluids. — 2011. — V. 44, N 1. — P. 358–368. — DOI: 10.1016/j.compfluid.2011.01.034.
71. **Morsi S. A., Alexander A. J.** An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // J. Fluid Mech. — 1972. — V. 55, N 2. — P. 193–208. — DOI: 10.1017/S0022112072001806.
72. **Xiao Y. L., Xia Z. X., Huang L. Y., Ma L. K., Yang D. L.** Численное моделирование течения суспензионного топлива на основе бора в прямоточном воздушно-реактивном двигателе // Физика горения и взрыва. — 2019. — Т. 55, № 3. — С. 126–137. — DOI: 10.15372/FGV20190314. — EDN: TXZTVF.
73. **Лепашев А. Н., Ксенофонтов С. И., Васильева А. М.** Движение горящих частиц металла в продуктах горения конденсированных систем // Вестн. Чувашского гос. пед. ун-та им. И. Я. Яковлева. — 2014. — № 4. — С. 15–22. — EDN: REODXT.
74. **Авдеев Б. А.** Модель движения частиц в магнитном гидроциклоне // Технолог. аудит и резервы произв-ва. — 2013. — Т. 5, № 1. — С. 36–41. — EDN: REEAXV.
75. **Горбис З. Р.** Теплообмен и гидродинамика дисперсных сквозных потоков. — 2-е изд. — М.: Энергия, 1970.
76. **Справочник по теплообменникам: в 2 т.** — М.: Энергоатомиздат, 1987. — Т. 1.
77. **Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б., Конович М. Н., Корчунов Ю. Н., Рундыгин Ю. А., Шагалова С. Л., Шестаков С. М.** Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат, 1986.
78. **Калинчук В. В., Кальян А. С.** Определение методической погрешности времени задержки воспламенения частиц на трековой установке // Физика аэродисперсных систем. — 1983. — № 23. — С. 70–72.
79. **Renie J. P., Osborn J. R.** Combustion modeling of aluminized propellants // 15th Joint Propulsion Conf., Las Vegas, NV, USA, 18–20 June, 1979. — DOI: 10.2514/6.1979-1131.

Поступила в редакцию 19.01.2024.

После доработки 23.05.2024.

Принята к публикации 03.07.2024.