

АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ВРЕМЕНИ ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

М. В. Бекстед

Университет им. Бригама Янга, 84602 Прово, Юта, США, mwb@caedm.byu.edu

Рассмотрены характеристики горения алюминия, при этом основное внимание уделено времени горения индивидуальных частиц. Собраны, систематизированы и подвергнуты корреляционному анализу данные более чем 10 источников (свыше 400 точек). Для выявления тенденций зависимостей характеристик горения от параметров среды также использованы имеющиеся математические модели. Обсуждены общие принципы описания горения алюминия, начиная с «закона D^n ». Показано, что для частиц алюминия в законе D^n показатель $n < 2$ и его типичные значения лежат в диапазоне $\approx 1.5 \div 1.8$. Рассмотрено влияние окружающей среды на время горения. Показано, что кислород как окисляющий агент примерно в два раза эффективнее воды и примерно в пять раз эффективнее углекислого газа. Влияние давления и начальной температуры среды незначительно.

Ключевые слова: частицы алюминия, время горения.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет алюминий добавляли в топливо в качестве дополнительного источника энергии. Это стимулировало исследование механизма горения алюминия, особенно интенсивные в 1960-е и 1970-е годы, когда началось практическое использование алюминия в топливных рецептурах. В ранних исследованиях Глассмен [1, 2] предположил, что горение металла аналогично горению капель углеводородного горючего, для которых справедлив закон D^2 , однако воспламенение и горение должны зависеть от температур плавления и кипения металла и оксида. Глассмен считал, что воспламенение частицы происходит при достижении температуры плавления оксидной пленки, а последующее стационарное горение устанавливается при достижении температуры кипения алюминия. Эти базовые принципы стали основой для интерпретации данных о горении алюминия.

Часто задают вопрос о применимости лабораторных результатов, полученных в среде воздуха при нормальном давлении и температуре, к условиям в ракетном двигателе, которые характеризуются высокими температурой и давлением, а также отсутствием кислорода в продуктах горения топлива. Эта проблема и определила одну из целей данной работы — развитие детальных представлений о горении алюминия на основе данных, полученных в ла-

бораторных условиях и на модельных двигателях. Агломерация и полнота сгорания алюминия, его влияние на образование шлаков и скорость горения топлива в данной работе не рассматриваются. Тем не менее, можно надеяться, что достигнутое здесь понимание закономерностей горения алюминия может быть полезным для решения этих проблем.

В 1970-е и в начале 1980-х годов появилось несколько обзоров, посвященных рассматриваемой теме, среди которых отметим [3–8]. В данной работе внимание сосредоточено на анализе данных по времени горения частицы алюминия и на определении влияния на него различных параметров. Ниже представлен краткий обзор исчерпывающих исследований, выполненных в России (ранее Советском Союзе), и изложены доступные из литературных источников данные, которые использовались для оценки влияния диаметра частиц, а также состава, давления и температуры среды на горение алюминия.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЯ В РОССИИ

Обзоры русских работ по горению алюминия имеются в [9], а также в ранее упомянутых работах [3, 4]. Читатель может использовать эти ссылки для получения представлений о предшествовавших исследованиях.

В 1968 г. А. Ф. Беляев с соавторами опубликовал классическую работу [10] по горению алюминия, которая цитируется в большинстве

последующих статей в русской литературе. В [10] алюминий вводили в состав топлива в количестве 0.01 %, что позволило избежать агломерации и измерить скорость горения отдельных частиц. Варьировали эффективные концентрации CO_2 и H_2O в газе, диаметр частиц и давление. В результате было получено следующее выражение для времени горения частицы:

$$\tau = 0.67D^{1.5}/a_k^{0.9} \text{ [мс]}, \quad (1)$$

где D — диаметр частицы, мкм, a_k — относительная концентрация CO_2 и H_2O в газе. CO не рассматривался как активный окислитель, поскольку энергия разрыва связи для молекулы CO в два раза больше, чем для молекул CO_2 и H_2O . При давлениях ниже $\approx 25 \div 30$ атм имело место уменьшение времени горения на $\approx 10 \div 12$ %, а при больших давлениях зависимости от давления не наблюдали. Посредством изменения состава топлива величину a_k варьировали от 0.3 до 0.7, диаметр частиц изменяли от 70 до 140 мкм. Значение показателя степени 0.9 при a_k и множитель 0.67 в выражении (1) соответствуют указанным диапазонам вариации параметров. Было обнаружено, что время горения частиц уменьшается с увеличением температуры окружающего газа (в эксперименте до 2 000 К). Установлено, что время воспламенения частиц пропорционально D^2 и величина эффективной энергии активации реакции, приводящей к воспламенению, составляет ≈ 32 ккал/моль. Выражение (1) до настоящего времени используется в большинстве русских работ для описания времени горения алюминия.

По данным [11] размер ореола пламени вокруг горящей частицы алюминия, определенный по фотографиям, составляет $1.5 \div 4$ диаметра частицы D_0 . В работе [12] измеряли размер ореола путем гашения горящей частицы при соударении с предметным стеклом и установили, что размер пламени составляет $\approx 3D_0$. Подобные эксперименты сравнительно недавно проведены в [13].

Имеется ряд работ, посвященных воспламенению металлов, в частности алюминия. Авторы работы [14] предположили, что температура воспламенения совпадает с температурой плавления оксида Al_2O_3 (2 300 К), и оценили значение энергии активации реакции в 17 ккал/моль (в [10] — 32 ккал/моль). В обзоре [15] по воспламенению металлов, основанном на представлениях Глассмена, рассмотрено 13

различных металлов и 6 сплавов и представлена классификация характеристик воспламенения металлов в соответствии с соотношением плотностей металла и оксида и с температурой плавления оксида. В частности, вследствие непроницаемости оксида алюминия воспламенение алюминия невозможно до тех пор, пока оксид не расплавится. При достижении температуры плавления оксида происходят воспламенение частицы и последующий переход к горению.

В работе [16] измеряли температуру воспламенения алюминиевой частицы путем внедрения в нее термопары и получили значения $\approx 2\,000 \div 2\,100$ К. Сделано заключение, что воспламенение происходит при нарушении целостности оксидной пленки, которое необязательно связано с ее плавлением. В [17] установлено, что растрескивание оксидной пленки зависит от условий нагрева и состава среды и может происходить при разных температурах. В результате воспламенение и/или агломерация частиц алюминия возможны при довольно низких температурах, $\approx 1\,000 \div 1\,300$ К. По результатам исследования воспламенения некоторых металлов в отраженной ударной волне [18] также сделан вывод о том, что воспламенение может происходить при разрушении оксидной пленки вследствие механических напряжений. В работе [19] также высказано предположение, что при быстром нагреве воспламенение связано с растрескиванием оксидной пленки в результате напряжений, обусловленных различием коэффициентов температурного расширения металла и оксида. Авторы работы [20] заметили, что CrCl_3 может реагировать с оксидной оболочкой, понижая температуру воспламенения до ≈ 900 К.

Параметры частиц оксида, образующихся при горении металла, очень важны, поскольку во многом определяют характеристики работы ракетного двигателя. Они непосредственно связаны с полнотой сгорания металла и с демпфированием акустических колебаний газа в камере двигателя. В работе [21] измеряли распределение частиц Al_2O_3 по размерам в выхлопе из малых двигателей и установили, что оно двухмодально. Большая часть представляет собой так называемый «оксидный дым» — частицы с размерами $\approx 1.5 \div 2$ мкм, однако имеется и фракция более крупных частиц с размерами до ≈ 6 мкм. Также было замечено, что доля мелких частиц возрастает при увеличе-

нии давления. По данным [12] размер оксидных частиц, образующихся при горении алюминия в лабораторных экспериментах при атмосферном давлении, составляет $\approx 1 \div 2$ мкм.

Моделированию процессов воспламенения металла и перехода к горению посвящено множество работ. Например, модели воспламенения металлов (обычно алюминия) разрабатывались в работах [22–24]. Авторы [19, 22, 23, 25–27] развивали модели, учитывающие рост защитной оксидной пленки на поверхности, увязывая этот процесс с другими аспектами воспламенения (например, с прочностью и диффузионным сопротивлением оксидной пленки, теплотой фазового перехода и т. д.). В работах [19, 23] показано, что воспламенение может происходить при температурах, значительно меньших температуры плавления оксида. В [27] показано, что время воспламенения должно быть пропорционально D^2 . В [28] сделан вывод о том, что магний воспламеняется в режиме теплового взрыва, а воспламенение алюминия связано с достижением критической температуры (плавления оксида). Относительно критериев воспламенения мнения авторов расходятся, однако следует помнить, что авторы разрабатывали свои модели для разных условий воспламенения. В частности, одни рассматривали медленный нагрев, другие — очень быстрый нагрев, и т. д.

В работах [29–31] развивались модели расчета скорости горения металлов, прежде всего алюминия. В [32] изучалось влияние на горение оксида, накалываемого на поверхности частицы. В [31] построена модель горения алюминиевых капель, учитывающая диффузию окислителя к поверхности частицы и гетерогенную реакцию на этой поверхности. Авторы [31] утверждают, что на поверхности алюминий может реагировать с оксидом с образованием субоксида Al_2O , имеющего более высокое давление паров. Учитывая влияние разных окислителей (O_2 , H_2O , CO_2), они показали также, что время горения алюминия в CO_2 в два раза больше, чем в водяном паре, а в водяном паре в 1.5 раза больше, чем в кислороде. Модель [29] включает реакцию алюминия и воды. Эта модель предсказывает постоянство времени горения капли алюминия при давлении выше ≈ 24 атм и изменение времени горения при меньшем давлении, что согласуется с экспериментальными данными. Изменение времени горения при низких давлениях обусловлено по-

давлением процесса диффузии оксидным облаком.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ ЧАСТИЦ

Эта часть данной работы посвящена анализу данных из различных источников [33–50], которые перечислены в табл. 1. Используются только те источники, в которых вариации условий позволяют проследить закономерности. Данные, полученные при единственном наборе условий, не рассматриваются. Для определения зависимостей времени горения от разных параметров обработана и проанализирована база данных из ≈ 400 точек. Результаты анализа представлены ниже.

Данный обзор не является полным и включает наиболее значимые исследования. В частности, такие, где определено время горения алюминиевых частиц и его можно сравнить с результатами других авторов. Наряду с обсуждением результатов и выводов представлено краткое описание методик. Для простоты исследования классифицированы по способу воспламенения частиц алюминия: в топливе, в газовой горелке, лазером, вспышкой и в ударной волне.

Горение алюминиевых частиц в составе топлива

Очевидное достоинство способа воспламенения алюминиевых частиц в составе топлива заключается в том, что создаются условия, близкие к условиям в ракетном двигателе. Имеются, однако, экспериментальные трудности, связанные с необходимостью воспроизводить высокую температуру, давление и состав агрессивной среды продуктов горения топлива.

В экспериментах [35] использовались образцы топлива, состоящего из перхлората аммония (ПХА) и параформальдегида с массовой долей алюминия менее 1 %. Образцы сжигали в бомбе при давлении до 200 атм. Горение частиц регистрировали скоростной кинокамерой через окно. Полученные данные по временам горения частиц с начальным диаметром $53 \div 103$ мкм наилучшим образом аппроксимировались выражением вида формулы (1), при показателе степени, равном 1.8. Было также замечено, что скорость горения частиц возрастает при увеличении давления от 20 до 70 атм, но при дальнейшем увеличении давления не меняется.

Таблица 1

Литературные данные по горению алюминия

D_0 , мкм	T_0 , К	p , атм	Концентрация газа, %							Источ- ник
			H ₂ O	O ₂	CO ₂	CO	N ₂	Ar	HCl	
15 ÷ 67	2510	1	17 ÷ 18	5 ÷ 6	12 ÷ 14	0	63 ÷ 65	0	0	[33, 34]
60 ÷ 96	2200 ÷ 3200	1 ÷ 204	0,5 ÷ 50	0 ÷ 27	9 ÷ 50	9 ÷ 41	9 ÷ 41	0	0 ÷ 21	[35]
32 ÷ 49	2500	1	0 ÷ 17	8 ÷ 16	13 ÷ 43	0	40 ÷ 58	0	0	[36]
23 ÷ 94	3000 ÷ 3189	25.5	27 ÷ 34	0 ÷ 4	17 ÷ 23	9 ÷ 30	13 ÷ 20	0	0 ÷ 8	[37]
24 ÷ 74	298	2 ÷ 5	0	10 ÷ 30	0	0	70 ÷ 90	90	0	[38]
250 ÷ 400	298	1	0 ÷ 3	15 ÷ 75	0 ÷ 50	0	0 ÷ 80	0 ÷ 85	0	[39]
300 ÷ 760	1809 ÷ 1827	1	29 ÷ 31	10 ÷ 25	27 ÷ 30	15 ÷ 49	46 ÷ 64	0	0	[40, 41]
20	2225 ÷ 2775	85 ÷ 34	0	99	0	0	1	0	0	[42]
35 ÷ 40	298	1 ÷ 39	0	21	0	0	79	0	0	[43, 44]
40 ÷ 70	3000	1	66 ÷ 89	11 ÷ 16	0 ÷ 18	0	0	0	0	[45]
106	2300	13 ÷ 22	41 ÷ 38	0 ÷ 11	12 ÷ 16	9 ÷ 2	10	0	18	[46]
90, 200	298	1	0	5 ÷ 100	0	0	5 ÷ 90	0 ÷ 95	—	[47, 48]
185 ÷ 500	298	1 ÷ 40	0	0 ÷ 20	0 ÷ 100	0	0 ÷ 80	0 ÷ 80	0	[49, 50]

В работах [33, 36], так же как и в [35], исследовали образцы алюминизированных топлив, которые сжигали при давлениях до 135 атм. При горении при атмосферном давлении в продуктах горения обнаружены полые оксидные сферы.

Подобные эксперименты выполнены в [37] с модифицированным смесевым составом на основе двухосновного топлива. Топливо содержало три компонента: ПХА, нитроцеллюлозу и нитроглицерин. Изменение состава такого топлива позволило обеспечить более широкий диапазон вариации окисляющих сред для частиц алюминия. Эксперименты проводились с частицами алюминия со средними диаметрами 23, 54 и 94 мкм при давлениях 19, 26 и 50 атм. Зависимости времени горения от давления и состава окислителя оказались подобны зависимостям, полученным в [35], однако показатель степени при давлении составлял 0.4.

В работах [51, 52] использовали два подхода для исследования горения алюминиевых частиц в пламени топлива на основе ПХА и полибутадиена с концевыми гидроксильными группами (НТРВ). В первом подходе использовались образцы алюминизированного топлива подобно тому, как это делали авторы уже рассмотренных работ [33, 35–37]. При этом в

продукты горения топлива посредством инжектора мог быть введен дополнительный кислород для увеличения его концентрации до 10 %. Скорость горения частиц слабо зависела от концентрации кислорода, но этот вывод может быть ошибочным в связи с плохим смешением кислорода с продуктами горения топлива. Скорость горения частиц линейно увеличивалась с давлением в диапазоне 13 ÷ 22 атм. Второй подход заключался в том, что в продукты горения неалюминизированного топлива ПХА/НТРВ инжектором вводили поток монодисперсных частиц алюминия. Время горения частиц определяли посредством стробоскопического фотографирования. Для частиц размером 68 мкм время горения составило (10 ± 2) мс, что согласуется с другими опубликованными результатами.

Воспламенение алюминиевых частиц в пламени газовой горелки

В экспериментах, использующих газовые горелки, алюминиевые частицы воспламеняются, проходя через достаточно горячее газовое пламя. Горючим служит пропан, угарный газ, метан, водород, циан; окислителем — кислород, который при необходимости разбавляют азотом. После воспламенения алюминиевая

частица горит в продуктах горения газового пламени, которое помимо кислорода содержит также воду и диоксид углерода как добавочные окислительные агенты. В результате создается среда, подобная продуктам горения твердых топлив, но лучше контролируемая экспериментатором. За редким исключением большинство исследований с газовыми горелками проведено при атмосферном давлении, поскольку создание контролируемого газового пламени при высоких давлениях связано с техническими трудностями [45]. Стробоскопическое фотографирование и скоростные кинокамеры — типичные инструменты для измерения времени горения частиц.

Авторы работ [33, 34, 36] одни из первых опубликовали результаты измерения времени горения алюминиевых частиц с размером $30 \div 50$ мкм в пламени пропан — кислород и оксид углерода — кислород и выявили небольшие различия. В обоих случаях образовывались полые или пористые оксидные сферы и оксидный дым. Полые оксидные «пузыри» были более многочисленны в средах, содержащих воду. Исследователи также отметили более выраженную фрагментацию частиц в случае энергичного горения алюминия в средах, богатых кислородом. По данным [33, 34, 36] показатель степени при D в формуле (1) составляет $1.2 \div 1.5$.

В работе [53] пламя метана использовали для зажигания нескольких фракций частиц алюминия со средними диаметрами $15 \div 32$ мкм. Обнаруженные после сгорания полые оксидные сферы были близки по размеру к исходным алюминиевым частицам. При исследовании измельченных сфер под микроскопом обнаружена пористая структура с вкраплениями металла.

В работе [35] пламя оксида углерода использовалось для воспламенения алюминиевых частиц размером $53 \div 66$ мкм. На фотографиях видно, что размер светящегося пламени вокруг частицы в несколько раз больше ее диаметра, что свидетельствует о парофазном механизме горения. В остатках, собранных после горения, также имелись пористые оксидные сферы. Было замечено усиление фрагментации частиц при объемных концентрациях кислорода свыше 32 %. Автор предположил, что время горения частицы обратно пропорционально парциальному давлению кислорода. Сделан также вывод о том, что концентрация кислорода в среде сильнее влияет на скорость горения частиц,

чем температура среды.

В работах [39, 54–56] проведены детальные эксперименты по горению частиц алюминия с размерами $30 \div 400$ мкм в пламенах водорода, оксида углерода и циана с кислородом. С использованием фотографической техники определено время горения, под микроскопом исследована морфология погашенных частиц. И в водородном пламени, и в пламени угарного газа наблюдали вращение частиц, выбросы струй металлического пара, выраженную фрагментацию частиц. Размер ореола пламени вокруг частицы в водородном пламени был меньшего диаметра, чем в пламени оксида углерода, что, возможно, объясняется более высоким коэффициентом диффузии воды в водородном пламени образовывалось больше полых оксидных сфер. В пламени оксида углерода в продуктах горения присутствовало заметное количество несгоревшего алюминия. При добавлении всего 5 % водорода в пламя оксида углерода результаты были такие же, как в случае водородно-кислородного пламени. Поведение частиц в пламени циана было аналогично их поведению в пламени угарного газа.

Авторы работ [40, 41] смешивали алюминиевый порошок с углеводородным топливом JP-10 для реактивных двигателей, получая капли суспензии размером $500 \div 1100$ мкм. Эти капли подвешивали на волокне из карбида кремния и быстро вводили в горячий поток газов пламени оксида углерода или метана. После выгорания жидкого топлива частицы алюминия агломерировали и образовывали алюминиевую частицу диаметром $300 \div 800$ мкм. Проводя скоростную киносъемку горения полученной частицы, авторы [40, 41] заметили, что размер ореола парофазного пламени был меньше в пламени метана, где может присутствовать вода, чем в «сухом» пламени оксида углерода. В случае «влажной» среды отмечены взрывы и фрагментация частиц. В пламенах с недостатком горючего наблюдали уменьшение времени горения частицы алюминия при увеличении количества избыточного кислорода.

В экспериментах [45] одиночные частицы алюминия воспламеняли в диффузионном пламени оксид углерода — водород. Частицы размером $40 \div 80$ мкм отбирали индивидуально под микроскопом. Процесс горения регистрировали с помощью фотоумножителя. Морфологию погашенных частиц изучали с использова-

нием оптического и сканирующего электронного микроскопов и рентгенофазового анализа. В продуктах горения преобладали пористые оксидные сферы. Обнаружено, что скорость горения частицы сильно зависит от концентрации окислителя (H_2O , CO_2 или O_2). Один из существенных выводов авторов [45] состоит в том, что различие значений показателя степени в выражении для времени горения частицы, наблюдаемое у разных исследователей, может быть в большей степени обусловлено различием методик обработки данных, чем физических условий экспериментов. Авторы [45] полагают, что показатель степени, вероятно, меняется в процессе горения частицы от ≈ 2 при воспламенении до ≈ 1 при ее догорании. Предполагается, что уменьшение скорости горения происходит из-за накопления оксида на поверхности расплавленной алюминиевой сферы.

Авторы работы [57] использовали фотодиоды для измерения времени горения небольшого облака алюминиевого порошка в бомбе при давлениях $38 \div 145$ атм. Алюминиевые частицы диаметром около 22 мкм вводили в бомбу после того, как зажженная смесь $\text{H}_2/\text{O}_2/\text{N}_2$ создавала высокую температуру и давление. Результаты работы [57] хорошо соответствуют данным [35], но демонстрируют более сильную зависимость от давления.

Воспламенение алюминиевых частиц лазером, вспышкой и ударной волной

Некоторые исследователи для воспламенения алюминиевых частиц использовали лазеры, импульсные источники света или ударные волны. Эти методы воспламенения не зависят от параметров среды, поэтому ее температуру, давление и состав можно варьировать в широких пределах. В работе [38] одиночные алюминиевые частицы зажигали лазером в кислородно-аргоновой среде. Обнаружено, что значительное разбавление аргоном подавляет образование оксидных колпачков и фрагментацию частиц. Горение частиц без оксидных колпачков соответствует парофазной модели [58]. Применяемая авторами [38] техника скоростной фотосъемки позволяла регистрировать динамику процесса горения частиц размером 50 мкм при давлении в камере до 5 атм.

В [59] и [39, 60] использовали лазер для зажигания одиночных частиц алюминия, а также ксеноновую лампу-вспышку для зажигания небольших дисков из алюминиевой фоль-

ги. Расплавленные диски превращались в капли диаметром $250 \div 400$ мкм, которые горели при комнатной температуре в средах CO_2/O_2 , N_2/O_2 , и Ar/O_2 . В некоторых экспериментах среду «увлажняли», вводя водяной пар в качестве второго окислителя. Эксперименты проводили при атмосферном давлении, процесс горения регистрировали при помощи скоростной кинокамеры. Морфологию погашенных частиц исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа. Оксидные колпачки не образовывались при горении в кислородно-аргоновой среде, что соответствует результатам работы [38], но образовывались при введении воды. В среде углекислого газа при комнатной температуре частицы гаснут до того, как израсходуется весь металлический алюминий. В азотно-кислородной среде частицы фрагментируют независимо от количества присутствующего водяного пара. Во многих экспериментах наблюдали полые оксидные сферы.

Авторы работы [42] использовали ударную трубу для воспламенения алюминиевых, магниевых и алюминиево-магниевых частиц при давлениях до 34 атм в практически чистом кислороде. Несколько тысяч частиц с номинальным диаметром 20 мкм помещали на лезвие ножа вблизи отражающей стенки ударной трубы. Ударная волна сбрасывала частицы и поджигала их в свободном падении. Излучение горящих частиц регистрировали фотодиодом. Установлено, что время горения частиц слабо зависит от давления, но все же уменьшается с ростом давления.

В работах [61–63] применяли лазер мощностью 150 Вт для зажигания частиц размером 230 мкм в чистом N_2O , чистом CO_2 и в смесях O_2 , N_2 , Ar и He . Температуру и распределение компонентов вокруг одиночных горящих частиц измеряли бесконтактно методом планарной лазер-индуцированной флуоресценции. Погашенные частицы исследовали методом электронно-зондового микроанализа. Авторы [61–63] установили, что диаметр пламени вокруг частицы зависит от среды сжигания и уменьшается в следующей последовательности: O_2/Ar , O_2/N_2 , CO_2 и N_2O . В качестве промежуточного компонента в процессе горения обнаружен AlO , кроме того, в начале реакции присутствуют оксинитриды алюминия. Измерения подтвердили, что температура кипения оксида алюминия лимитирует температуру пламени.

В экспериментах [43, 44] измеряли время горения частиц алюминия размером 40 мкм в воздухе при давлениях 1 ÷ 40 атм, зажигая их лазером. Наблюдаемые времена горения несколько убывали при увеличении давления в указанном диапазоне. Авторы также провели расчеты времени горения по модифицированной модели Лоу [64] (весьма схожей с моделью Брукса [65]). Расчеты предсказывают, что после полного выгорания частицы алюминия размером D_0 остается оксидная частица размером $0.7D_0$ и размер остаточной оксидной частицы слегка увеличивается с ростом давления. Расчетные времена горения были несколько больше наблюдаемых экспериментально, что авторы объясняют неопределенностью величины использованного в модели произведения плотности и коэффициента диффузии.

В работе [13] сжигали капли алюминия размером 150 мкм в воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении (как в экспериментах [39]). На начальной стадии горения частицы сферически-симметричны, затем наступают стадии осциллирующего горения, для которых характерны выбросы струй пара метилла и спиральные следы, свидетельствующие о вращении частиц. Впоследствии в [47, 48] были исследованы частицы размером 90 и 250 мкм в смесях N_2/O_2 , Ar/O_2 , He/O_2 в различных пропорциях и в чистом O_2 . Вращение и периодические колебания яркости (регистрируемые с использованием фотоэлектронного умножителя) наблюдались главным образом в среде N_2/O_2 , а также в He/O_2 . Размер оксидных колпачков при сжигании в среде Ar/O_2 и He/O_2 был гораздо меньше, чем в воздухе. При горении алюминия в газовых смесях различных концентраций заметно уменьшение времени горения с увеличением концентрации кислорода. Скорости горения в смесях с аргоном и азотом находятся в хорошем согласии между собой, что автор [47, 48] объясняет примерно постоянным значением произведения плотности и коэффициента диффузии. В [48] исследовалось также горение частиц алюминия в условиях невесомости.

ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

На рис. 1 представлены результаты измерения времен горения частиц алюминия, опубликованные в различных работах. Очевиден заметный разброс результатов. Некоторые исследова-

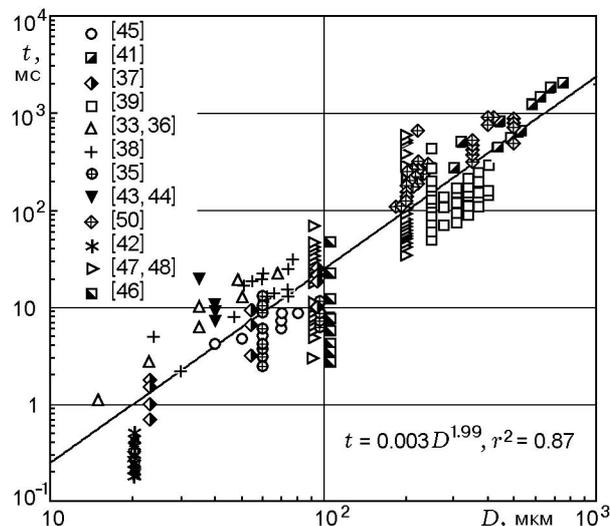


Рис. 1. Время горения алюминиевых частиц, определенное в различных условиях по разным методикам

дователи работали с ограниченным набором размеров частиц, изменяя условия экспериментов. Например, в [47, 48] варьировалась концентрация газов, но использовались частицы только двух размеров; в [39, 42, 46] также экспериментировали в основном с частицами одного размера. Одна из причин разброса данных на рис. 1 — различие условий экспериментов. Ниже обсуждаются и другие источники разброса данных. Любопытно отметить, что данные лучше всего аппроксимируются зависимостью D^2 . Значение показателя степени в выражении для времени горения подробнее будет рассмотрено в последующих параграфах.

Горение алюминия и «закон D^2 »

Геометрический аспект горения частиц или капель может быть описан уравнением сохранения массы. Предполагая, что капля сферическая и равномерно уменьшается в размере, запишем выражение для массовой скорости:

$$\dot{m} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \rho \right) = -4\pi r^2 \rho \frac{dr}{dt} \quad (2)$$

или, заменяя радиус на диаметр:

$$\dot{m} = -\pi D^2 \rho \frac{d(D/2)}{dt} = -\frac{\pi D \rho}{4} \frac{dD^2}{dt} \quad (3)$$

Выражение для скорости изменения диаметра:

$$\frac{dD^2}{dt} = -\frac{4\dot{m}}{\pi D\rho} = \text{const}, \quad D^2 = D_0^2 - \beta t, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{4\dot{m}}{\pi D\rho}$.

Решение для времени:

$$t = \frac{D_0^2 - D^2}{\beta}, \quad (5)$$

при полном выгорании $D \Rightarrow 0$ и $t = \frac{D_0^2}{\beta}$,

что обычно называют «законом D^2 ». Применим ли этот закон для горения алюминия? Прежде всего, заметим, что выражение (5) получено в предположении, что диаметр капли убывает равномерно. Во многих работах, однако, отмечено образование оксидных колпачков на горящем алюминии. Таким образом, капля алюминия уменьшается неравномерно. Из-за наличия оксидного колпачка не вся поверхность сферы доступна для горения, и это приводит к модификации закона горения вида D^n . Кроме того, при выводе (5) предполагается, что частица сгорает до нулевого диаметра, однако и это не соответствует экспериментальным наблюдениям горения алюминиевой частицы. Многие исследователи наблюдали фрагментацию горящих частиц алюминия. Это означает, что к концу горения алюминиево-оксидный колпачок может быть разрушен, и в результате горения получится более чем одна остаточная частица. Кроме того, даже в отсутствие фрагментации остаточная частица из-за пористости часто слишком велика, чтобы остаться целой. То, что частица при горении не уменьшается до нулевого диаметра, также приводит к понижению показателя степени (меньше двух). В недавних расчетах [44] по разработанной авторами модели для времени горения алюминия получен размер остаточной частицы оксида, равный $0.6 \div 0.7$ начального диаметра алюминиевой частицы.

Из изложенного следует, что для алюминия трудно ожидать показателя степени, равного 2. Более вероятное значение лежит в интервале $1.5 \div 1.8$.

Ряд упомянутых наблюдений был еще раз подтвержден в недавней работе [45]. Эксперименты проводили с частицами размером 70 мкм, тщательно выбранными под микроскопом, чтобы быть как можно более одинаковыми. Частицы гасили на разных этапах горения посредством соударения со стеклянными

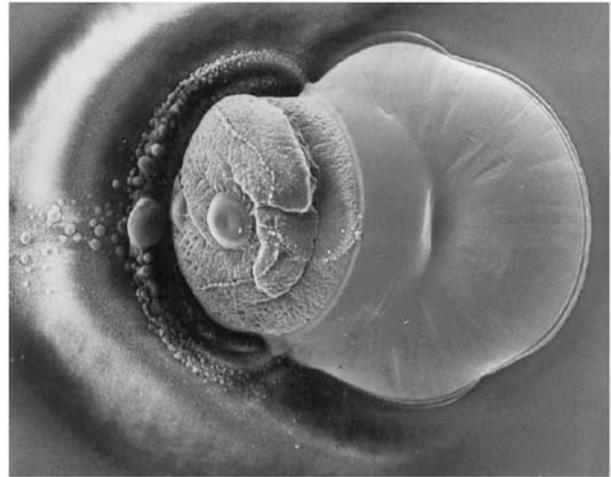


Рис. 2. Алюминиевая частица размером 70 мкм, погашенная через $2.5 \div 3$ мс после воспламенения (изображение получено на сканирующем электронном микроскопе)

пластинами и затем исследовали на сканирующем электронном микроскопе (рис. 2). Правая часть частицы — это Al_2O_3 , гораздо меньшая левая часть кольцеобразной формы — алюминий. Это было установлено по дымному ореолу слева и с помощью рентгенофазового анализа. Из рис. 2 видно, что ближе к концу горения оксидный колпачок может быть больше исходной частицы алюминия.

Для регистрации интенсивности свечения горячей частицы использовали фотодиод. На рис. 3 представлены записи сигнала фотодиода для пяти частиц, погашенных на разных стадиях горения. Частица, приведенная на рис. 2, соответствует кривой 2 на рис. 3. Очевидно (см. также первоисточник [45]), что если использовать сигнал фотодиода для определения времени горения частицы, то большая часть этого времени будет соответствовать горению малой доли алюминия. Большая часть алюминия сгорала весьма быстро, но фотодиод продолжал регистрировать свет от горячей оксидной частицы, содержащей совсем немного еще горящего алюминия. На рис. 3 видно, что для всех пяти частиц большая часть алюминия сгорела уже к моменту гашения первой частицы, что дает время горения ≈ 1.5 мс. Если же за время горения брать полное время свечения, то его значение составит 6.5 мс. Произвол при выборе «времени горения» разными исследователями может внести заметный разброс в данные, полученные из разных источников.

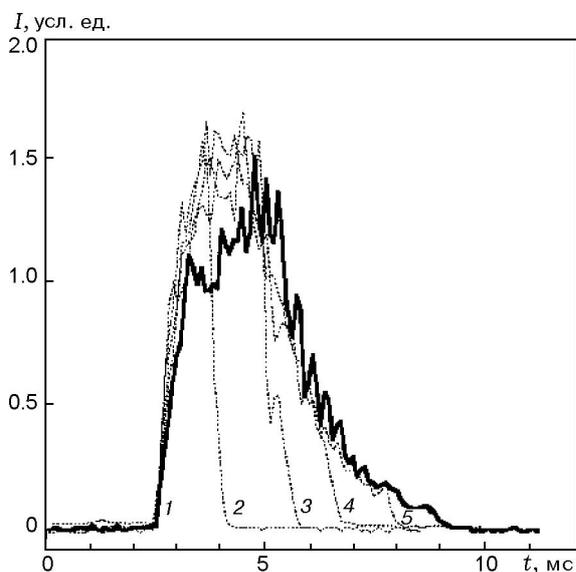


Рис. 3. Запись сигнала фотодиода, регистрирующего свечение пяти разных алюминиевых частиц размером 70 мкм, погашенных на разных стадиях горения

В модели [65] при расчете времени горения учитывали относительные доли алюминия и оксида. Расчеты проведены для частицы размером 35 мкм, горящей при давлении 1 атм в среде, соответствующей продуктам горения твердого топлива. На рис. 4 представлены результаты двух вариантов расчета — с учетом и без учета накопления оксида. Расчет, игнорирующий накопление оксида, дает время горения, соответствующее закону D^2 . Расчет, допускающий накопление оксида, соответствует закону $D^{1.5}$ и согласуется с результатами ранее упомянутых экспериментов [43, 44]. Это еще один аргумент в пользу того, что показатель степени при диаметре должен быть меньше 2.

В большинстве экспериментальных исследований время горения алюминиевой частицы не соответствует модели D^2 . Например, в [3, 39, 46, 64–67] предлагается меньший показатель степени, вплоть до значения 1.2. Статистический анализ, проведенный в рамках данной работы, показывает, что показатель ≈ 1.8 наилучшим образом соответствует имеющимся данным.

Влияние окислительной среды

Влияние кислорода. Основной причиной

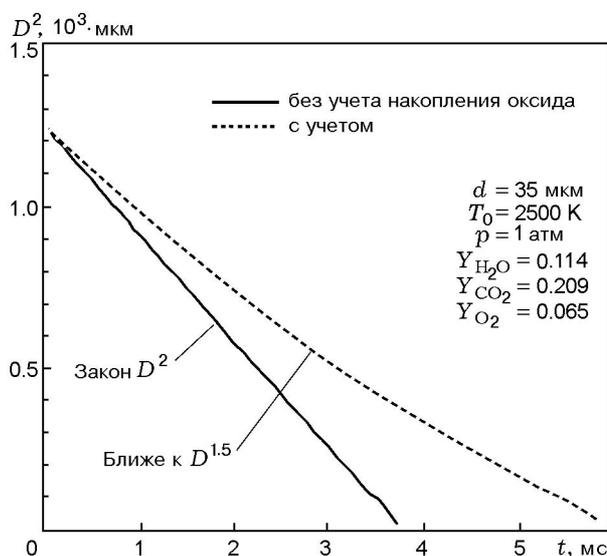


Рис. 4. Влияние накопления оксида на поверхности горящей частицы на время горения (расчет по модели Брукса [65])

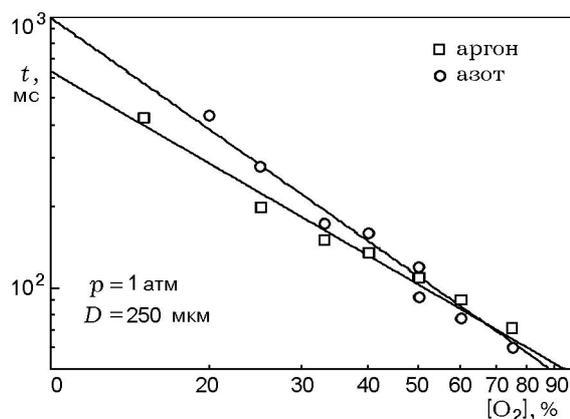


Рис. 5. Время горения по данным [39] для частиц размером 250 мкм, горящих в кислородно-азотной и кислородно-аргоновой средах

разброса данных на рис. 1 является использование в разных экспериментах разных окисляющих (и инертных) газов. Авторы ряда работ исследовали влияние окружающего газа. Так, в [39] описаны эксперименты при давлении 1 атм с частицами размером 250 мкм при изменении концентрации кислорода в смеси с азотом или аргоном. Результаты исследований [39] представлены на рис. 5 и показывают яркое выраженное влияние концентрации кислорода: чем больше его концентрация, тем меньше время горения. Этого следовало ожидать, поскольку

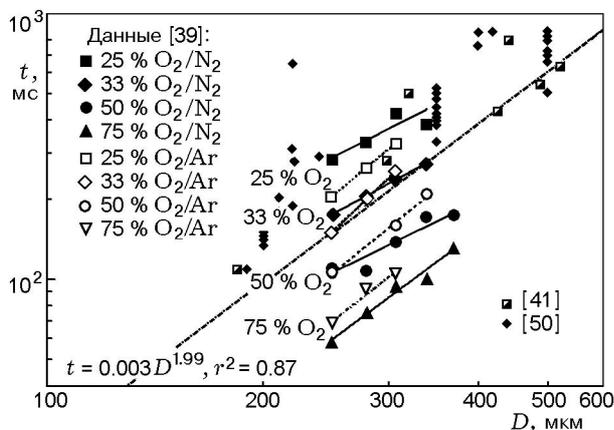


Рис. 6. Результаты работы [39] для частиц различных размеров, сжигаемых в кислородно-азотной и кислородно-аргоновой средах: для сравнения приведены данные [41] и [50] и общая корреляционная зависимость

в диффузионном пламени градиент концентрации — основной фактор, и более высокие концентрации обеспечивают короткие времена горения.

Наряду с изменением концентрации кислорода в [39] также варьировались размеры частиц. Эти результаты представлены на рис. 6 в виде зависимости времени горения от диаметра. Для справки приведены также результаты [41] и [50] и общая корреляционная зависимость. Эти результаты демонстрируют тот же эффект, что и рис. 5, но в терминах обычной зависимости для времен горения от диаметра.

Влияние коэффициента диффузии. В [47] получены результаты, подобные результатам [39], при варьировании концентрации кислорода в смесях с инертными газами — азотом, аргоном и гелием. Данные [47] количественно соответствуют данным [39]. Кроме того, использование гелия расширяет диапазон варьируемых параметров. В дифференциальное уравнение, описывающее диффузию, входит произведение коэффициента диффузии и плотности, умноженное на градиент концентрации. Это произведение определяет влияние коэффициента диффузии на процесс горения. Считается, что коэффициент диффузии пропорционален температуре в степени 1.65 и обратно пропорционален давлению. Таким образом, произведение плотности на коэффициент диффузии должно практически не зависеть от давления, но слабо зависеть от окружающей температуры (приблизительно в степени 0.65). Гелий

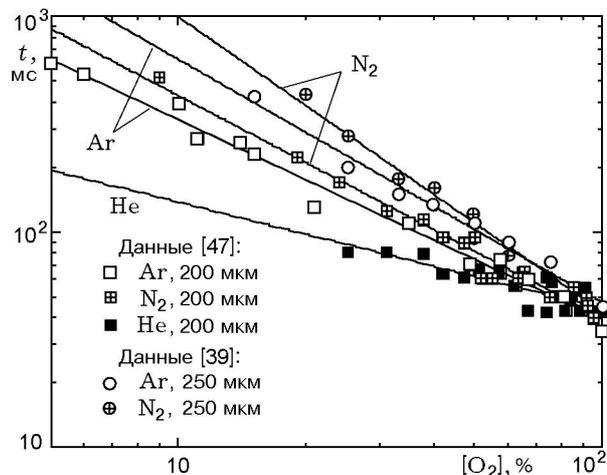


Рис. 7. Данные [39] и [47], полученные при вариации концентрации кислорода в смесях с азотом, аргоном и гелием

имеет более высокий коэффициент диффузии, но гораздо меньшую молекулярную массу (которая входит в произведение плотности на коэффициент диффузии), чем азот и аргон. Поэтому небольшая молекулярная масса может компенсировать большой коэффициент диффузии.

На рис. 7 представлены результаты [47] для частиц размером 200 мкм в сравнении с результатами [39] для частиц размером 250 мкм. Видно, что при малых концентрациях кислорода время горения уменьшается от азота к аргому и от аргона к гелию. Молекулярная масса изменяется в другом порядке: у аргона — 40, у азота — 28, у гелия — 4. Подобный эффект был постулирован в [68] при построении корреляционной зависимости, учитывающей влияние коэффициента диффузии. В частности, особенно заметно было влияние количества водорода, образованного в реакции взаимодействия алюминия и воды. Эти наблюдения обосновывают необходимость проведения дополнительных исследований.

Влияние CO_2 и воды. Определение влияния CO_2 и воды на время горения частиц алюминия весьма затруднительно вследствие ограниченной возможности систематической вариации концентраций этих реагентов. Большая часть данных получена в экспериментах с топливными образцами либо газовыми пламенами. В экспериментах [45] варьировалось количество воды, при этом использовалось во-

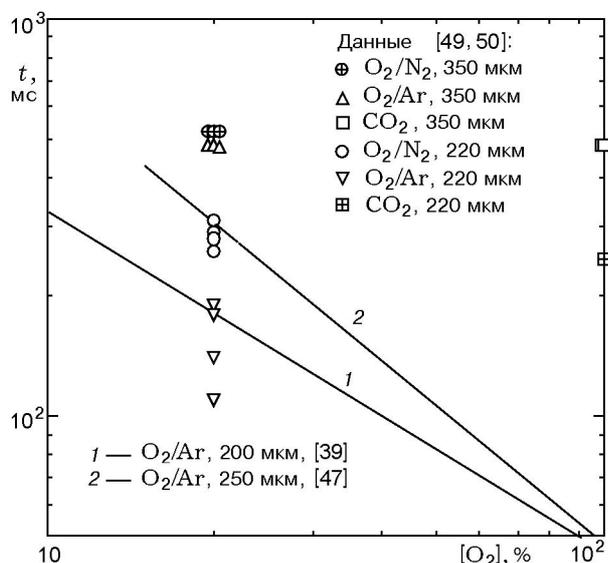


Рис. 8. Времена горения частиц в смесях (20 % O₂ + Ar) и (20 % O₂ + N₂) и в CO₂ по данным [49]: точки, соответствующие горению в чистом углекислом газе, условно нанесены на рамке рисунка справа; для сравнения приведены те же результаты [39, 47], что и на рис. 7

дородное пламя, дающее большее количество воды по сравнению с другими. К сожалению, варьировать содержание воды достаточно сложно. Поэтому имеющиеся данные гораздо менее определенные, чем рассмотренные выше данные о влиянии концентрации кислорода. По данным [68] относительная эффективность кислорода, воды и CO₂ характеризуется значениями 1:0.58:0.25.

Превосходный набор данных для определения влияния CO₂ получен в недавних экспериментах [49, 50]. Частицы алюминия одного и того же размера сжигали в воздухе, чистом диоксиде углерода, кислородно-азотных и кислородно-аргоновых смесях, подобно [39, 47], но без вариаций концентрации. На рис. 8 представлены данные [49, 50] по временам горения частиц размером 220 и 350 мкм в средах 20 % O₂ + Ar и 20 % O₂ + N₂. Времена горения в 100 % CO₂ были такие же, как в средах с 20 % O₂. То есть эффективность CO₂ как окислителя составляет ≈20 % по отношению к O₂. Для сравнения на рис. 8 приведены результаты [39] и [47] горения частиц (250 и 200 мкм соответственно) в кислородно-аргоновой среде.

Имеющиеся данные не позволяют дать окончательное заключение о влиянии воды. В работе [65] было предложено использовать кон-

Таблица 2
Коэффициенты относительной эффективности воды и CO₂ при окислении алюминия

Источник	Год	O ₂	H ₂ O	CO ₂
[10], эксперимент?	1968	—	1	1
[29], модель	1979	1	0.667	0.333
[65], модель	1995	1	0.533	0.135
[68], модель	1998	1	0.67	0.33
Данная работа, эксперимент	2000	1	0.5 ÷ 0.6	0.22

центрацию эффективного окислителя

$$X_{eff} = C_{O_2} + a_{H_2O} C_{H_2O} + a_{CO_2} C_{CO_2}, \quad (6)$$

где $a_{H_2O} = 0.533$ и $a_{CO_2} = 0.135$ — коэффициенты, учитывающие эффективность воды и CO₂ по сравнению с кислородом ($a_{O_2} = 1$), определенные в модельных расчетах.

Результаты исследований влияния H₂O и CO₂ обобщены в табл. 2. В данной работе коэффициент эффективности CO₂ оценен значением ≈0.22, к которому приводят несколько разных способов анализа данных. Полученная величина обусловлена в значительной мере данными работ [49, 50], где измерялось время горения в чистом диоксиде углерода. Как уже отмечалось, варьировать концентрацию воды затруднительно и данные по ее влиянию неокончательны. Имеющиеся на сегодня данные дают значение $a_{H_2O} \approx 0.5 \div 0.6$. Интересно отметить, что результаты разных исследователей на удивление хорошо согласуются.

Влияние давления и температуры окружающей среды

Данные о влиянии давления также пока неокончательные. В ранних русских работах считалось, что при относительно низких давлениях его влияние слабое, а при давлениях выше ≈20 атм отсутствует вовсе. Это можно считать разумным приближением. Недавняя работа [44] дает практически те же результаты. С использованием формулы (6) для определения эффективного окислителя со значениями, указанными в предыдущем параграфе, имеющиеся данные были построены в координатах «давление — величина tX_{eff}/D^n » с целью выявления корреляции между этими величинами. Несмотря на большой разброс данных, зависимость с

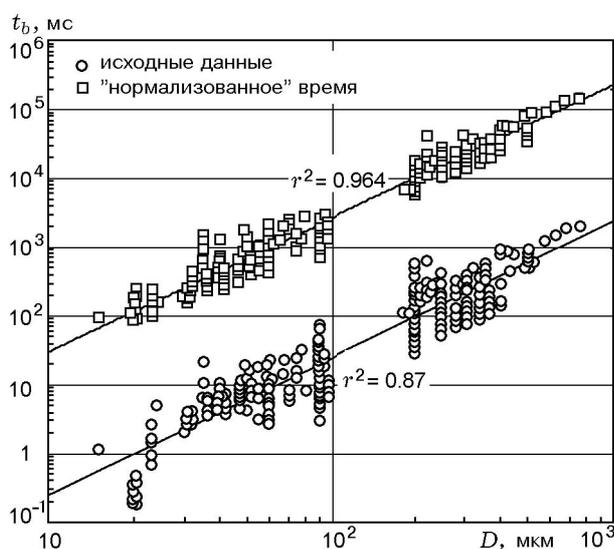


Рис. 9. Времена горения алюминиевых частиц разного размера, измеренные в различных условиях:

простейшая корреляционная зависимость $t_b = 0.003D^{1.99}$ (как на рис. 1) и предложенная в данной работе модифицированная зависимость $(t_b)' = 0.00735D^{1.8}$, где $(t_b)' = t_b X_{eff} p^{0.1} T_0^{0.2}$ — «нормализованное» время горения

показателем степени при давлении -0.1 , которая получена в [10] и [44], наилучшим образом описывает результаты. Использование диаметра в степени 1.8 дает несколько меньший разброс данных, чем при степени 1.5.

Изучение влияния начальной температуры среды тоже не завершено. Фактически, никто не варьировал систематически начальную температуру среды. Статистический анализ имеющегося набора данных дает значение показателя степени при начальной температуре среды -0.2 . При этом использование диаметра в степени 1.8 дает несколько больший разброс, чем при показателе степени 1.5.

Обобщенная корреляционная зависимость

На основе результатов анализа всего набора данных для оценки времени горения алюминиевых частиц получено следующее выражение:

$$t_b = \frac{aD^n}{X_{eff} p^{0.1} T_0^{0.2}}, \quad (7)$$

где $X_{eff} = C_{O_2} + 0.6C_{H_2O} + 0.22C_{CO_2}$, $a = 0.0244$ для $n = 1.5$ и $a = 0.00735$ для $n = 1.8$, давление — атм, температура — К, диаметр — мкм, время — мс.

Результаты обобщения представлены на рис. 9, где по оси ординат отложена модифицированная величина $t_b X_{eff} p^{0.1} T_0^{0.2}$.

Для сравнения на рис. 9 перенесены данные из рис. 1. Корреляционный анализ для модифицированных данных дает значение коэффициента детерминации $r^2 = 0.964$, а для первичных имеем $r^2 = 0.87$, уменьшение разброса данных хорошо видно на рисунке. Наиболее заметный вклад в уменьшение разброса вносит использование понятия эффективного окислителя. Несколько обескураживает лишь тот факт, что разброс данных хотя и уменьшается при использовании модифицированной величины $t_b X_{eff} p^{0.1} T_0^{0.2}$, остается все-таки относительно большим. По-видимому, это обусловлено многообразием методов получения и обработки данных, например, методик определения времени горения частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены характеристики горения индивидуальных алюминиевых частиц, прежде всего — время горения. Обсуждены основные концепции описания процесса, начиная с закона D^n . Собраны и единообразно обработаны экспериментальные данные более чем из 10 источников (свыше 400 точек). Разнообразие экспериментальных методик и отсутствие общепринятой процедуры определения времени горения приводят к значительному разбросу данных, полученных разными исследователями. Тщательный анализ имеющихся данных показал, что время горения коррелирует с диаметром частиц в степени 1.5 ÷ 1.8, причем значение $n = 1.8$ предпочтительнее.

В настоящее время накоплен большой объем данных о влиянии газообразной среды на горение состава. Систематический анализ полученной информации показал, что кислород более сильный окислитель, чем вода и CO_2 . По данным [49, 50] эффективность CO_2 составляет 20 % от эффективности кислорода. Относительно влияния воды пока нет полной ясности. Имеющиеся результаты позволяют считать, что вода примерно в два раза менее эффективна, чем кислород, и примерно в два раза эффективнее, чем CO_2 . Исследования со смесями кислорода и различных инертных газов при вариации концентрации кислорода показали, что имеется влияние коэффициента диффузии газа, точнее — произведения плотности на

коэффициент диффузии. Снижение молекулярной массы газа приводит к уменьшению времени горения. Влияние давления и начальной температуры среды незначительно. В ранних русских работах считалось, что эффект давления незначителен при малых давлениях и отсутствует при давлениях выше 20 атм. Последующие исследования подтвердили это заключение. Влияние начальной температуры также весьма слабо (корреляция с показателем степени -0.2).

Работа финансировалась Университетом им. Бригама Янга и ONR в рамках Мультидисциплинарной университетской исследовательской инициативы (МУРИ) (грант N00014-95-1-1338, менеджер программы доктор Иуда Голдвассер (Judah Goldwasser)).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Glassman I.** Metal Combustion Processes. New York, 1959. American Rocket Society Preprint 938-59.
2. **Бржустовский Т. А., Глассмен И.** Спектроскопическое исследование горения металлов // Гетерогенное горение / Под ред. В. А. Ильинского, И. Н. Садовского. М.: Мир, 1967. С. 59–90.
3. **Горение** порошкообразных металлов в активных средах / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, В. С. Логачев, А. И. Коротков. М.: Наука, 1972.
4. **Фролов Ю. В., Похил П. Ф., Логачев В. С.** Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных газовых средах и составе гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8, № 2. С. 213–236.
5. **Micheli P. L., Schmidt W. G.** Behavior of aluminum in solid rocket motors // AFRPL-TR-77-29. V. II. Aerojet Solid Propulsion Co., 1977.
6. **Glassman I., Mellor A. M., Sullivan H. F., Laurendeau N. M.** A review of metal ignition and flame models // AGARD Conf. Proc. N 52. 1970. P. 19-1–19-30.
7. **Price E. W., Kraeutle K. J., Prentice J. L., et al.** Behavior of aluminum in solid propellant combustion // NWC TP 6120. Naval Weapons Center, 1982.
8. **Price E. W.** Combustion of metalized propellants // Fundamentals of Solid Propellant Combustion. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 90) / К. К. Кuo, М. Summerfield (Eds). New York: Amer. Inst. of Aeronaut. and Astronaut., 1984. Ch. 14. P. 479–514.
9. **Pressley H. M.** Survey of soviet work in aluminum combustion // 14th JANNAF Combustion Meeting, III. 1977. P. 85–104.
10. **Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Коротков А. И.** О горении и воспламенении частиц мелкодисперсного алюминия // Физика горения и взрыва. 1968. Т. 4, № 3. С. 323–329.
11. **Борейшо А. С., Иващенко А. В., Шелухин Г. Г.** К вопросу об определении размеров горячей металлической частицы // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 4. С. 659–660.
12. **Архипов В. А., Ермаков В. А., Раздобре-ев А. А.** Дисперсность конденсированных продуктов горения капли алюминия // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 2. С. 16–19.
13. **Dreizin W. L., Trunov M. A.** Surface phenomena in aluminum combustion // Combust. Flame. 1995. V. 101, N 3. P. 378–382.
14. **Merzhanov A. G., Grigorjev Yu. M., Gal'chenko Yu. A.** Aluminum ignition // Combust. Flame. 1977. V. 29, N 1. P. 1–14.
15. **Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И.** Модели воспламенения металлов // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 4. С. 558–570.
16. **Ермаков В. А., Раздобреев А. А., Скори-к А. И. и др.** Температура частиц алюминия в момент воспламенения горения // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 2. С. 141–143.
17. **Локенбах А. К., Запорина Н. А., Книппе-ле А. З. и др.** Влияние условий нагрева на агломерацию порошкообразного алюминия в атмосфере воздуха // Физика горения и взрыва. 1985. Т. 21, № 1. С. 73–82.
18. **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.
19. **Rozenband V. I., Vaganova N. I.** A strength model of heterogeneous ignition of metal particles // Combust. Flame. 1992. V. 88. P. 113–118.
20. **Розенбанд В. И., Афанасьева Л. Ф., Лебедева В. А., Черненко Е. В.** Активация хлорным хромом воспламенения Al и его смесей с окислами // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 5. С. 13–15.
21. **Федоров Б. Н., Плечов Ю. Л., Тимохин Э. М.** Исследование дисперсности частиц окиси алюминия в продуктах сгорания конденсированных веществ // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 1. С. 22–27.
22. **Гостинцев Ю. А., Лазарев В. В., Фролов Ю. В.** К расчету критических условий воспламенения металла высокоскоростным нагретым потоком окислителя // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 3. С. 10–14.
23. **Гремячкин В. М.** К теории воспламенения металлических частиц // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 3. С. 9–14.
24. **Арутюнян А. Б., Харатян С. Л., Мержа-нов А. Г.** К теории воспламенения частиц металлов. I. Воспламенение частиц металлов при

- образовании твердых растворов // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 3. С. 16–22.
25. **Гуревич М. А., Озеров Е. С., Юринов А. А.** О влиянии пленки окисла на характер воспламенения алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 4. С. 50–55.
 26. **Беспрозванных В. А., Ермаков В. А., Раздобреев А. А.** Индукционный период нагрева частиц металла непрерывным лазерным излучением // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 6. С. 60–63.
 27. **Ковалев О. Б.** Адиабатический метод в тепловой теории воспламенения металлических частиц в газе // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 5. С. 29–33.
 28. **Медведев А. Е., Федоров А. В., Фомин В. М.** Математическое моделирование воспламенения частиц металла в высокотемпературном потоке за ударной волной // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 3. С. 5–9.
 29. **Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцов А. В., Шпара А. П.** Горение металлов при высоких давлениях (трехзонная модель) // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 50–57.
 30. **Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И.** Влияние обтекающего потока на горение капли металла // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 1. С. 32–36.
 31. **Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И.** Модель горения мелких капель металла // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 3. С. 366–373.
 32. **Бабук В. А., Белов В. П., Шелухин Г. Г.** Особенности горения частиц алюминия в составе смесевых конденсированных систем при низких и высоких давлениях // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 3. С. 26–31.
 33. **Friedman R., Maček A.** Combustion studies of single aluminum particles // Ninth Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1963. P. 703–709.
 34. **Friedman R., Maček A.** Ignition and combustion of aluminum particles in hot ambient gases // Combust. Flame. 1962. V. 6. P. 9–19.
 35. **Davis A.** Solid propellants: the combustion of particles of metal ingredients // Combust. Flame. 1963. V. 7, N 4. P. 359–367.
 36. **Maček A.** Fundamentals of combustion of single aluminum and beryllium particles // Eleventh Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1967. P. 203–217.
 37. **Hartman K. O.** Ignition and combustion of aluminum particles in propellant flame gases // 8th JANNAF Combustion Meeting. 1971. V. 1. P. 1–24.
 38. **Wilson R. P., Williams F. A.** Experimental study of the combustion of single aluminum particles in O₂/Ar // Thirteenth Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh PA: The Combust. Inst., 1971. P. 833–845.
 39. **Prentice J. L.** Combustion of laser-ignited aluminum droplets in wet and dry oxidizers // AIAA 12th Aerospace Sciences Meeting, 1974. AIAA Paper N 74-146; см. также: Prentice J. L. Aluminum droplet combustion: rates and mechanisms in wet and dry oxidizers // NWC TR 5569. 1974.
 40. **Wong S. C., Turns S. R.** Ignition of aluminum slurry droplets // Combust. Sci. Technol. 1987. V. 52. P. 221–242.
 41. **Turns S. R., Wong S. C., Ryba E.** Combustion of aluminum-based slurry agglomerates // Combust. Sci. Technol. 1987. V. 54. P. 299–318.
 42. **Roberts T. A., Burton R. L., Krier H.** Ignition and combustion of aluminum/magnesium alloy particles in O₂ at high pressures // Combust. Flame. 1993. V. 92. P. 125–143.
 43. **Marion M., Chauveau C., Gökalp I.** Studies on the ignition and burning of aluminum particles // AIAA Paper N 95-2861. 1995.
 44. **Marion M., Chauveau C., Gökalp I.** Studies on the ignition and burning of aluminum particles // Combust. Sci. Technol. 1996. V. 116. P. 369–390.
 45. **Olsen S. E., Beckstead M. W.** Burn time measurements of single aluminum particles in steam and carbon dioxide mixtures // J. Propulsion Power. 1996. V. 12, N 4. P. 662–671.
 46. **Melcher J. C., Burton R. L., Krier H.** Combustion of aluminum particles in in solid rocket motor flows // 36th JANNAF Combustion Meeting. V. 1. CPIA Publ. N 691. 1999. P. 249–258.
 47. **Dreizin E. L.** On the mechanism of asymmetric aluminum particle combustion // Combust. Flame. 1999. V. 117. P. 841–850.
 48. **Dreizin E. L.** Experimental study of aluminum particle flame evolution in normal and microgravity // Combust. Flame. 1999. V. 116. P. 323–333.
 49. **Zenin A., Kusnezov G., Kolesnikov V.** Physics of aluminum particle combustion at zero-gravity // AIAA Paper N 99-0696. 1999. P. 1–6.
 50. **Zenin A. A., Kusnezov G., Kolesnikov V.** Physics of aluminum particle combustion at convection // AIAA Paper N 2000-0849. 2000.
 51. **Burton R. L., Schneider D. S., Krier H.** Aluminum particle combustion in a pressurized flow reactor // Thirty-Fourth JANNAF Combustion Meeting, V. 2. CPIA Publ. N 662. Laurel, MD, 1997. P. 287–294.
 52. **Melcher J. C., Burton R. L., Krier H.** Combustion of aluminum particles in in solid rocket motor flows // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics. (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185) / V. Yang, T. B. Brill, Wu-Zhen Ren (Eds). Reston, VA: AIAA Inc., 2000. Ch. 2.20. P. 723–747.

53. **Bartlett R. W., Ong J. N., Fassell W. M., Papp C. A.** Estimating aluminum particle combustion kinetics // *Combust. Flame*. 1963. V. 7, N 3. P. 227–234.
54. **Дрю Ч., Гордон А., Кнайп Р.** Исследование процесса горения частицы алюминия методом гашения // *Гетерогенное горение* / Под ред. В. А. Ильинского, И. Н. Садовского. М.: Мир, 1967. С. 35–58.
55. **Гордон, Дрю, Прентис, Найп.** Методы исследования горения металлов // *Ракетная техника и космонавтика*. 1968. Т. 6, № 4. С. 3–11.
56. **Price E. W., Christensen H. C., Knipe R. H., et al.** Aluminum particle combustion progress report // NOTS-TP-3916. Naval Ordnance Test Station, China Lake, CA, 1966.
57. **Foelsche R. O., Burton R. L., Krier H.** Ignition and combustion of aluminum particles in $H_2/O_2/N_2$ combustion products // *J. Propulsion Power*. 1998. V. 14, N 6. P. 1001–1008.
58. **Бржустовский Т., Гласмен И.** Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия // *Гетерогенное горение* / Под ред. В. А. Ильинского, И. Н. Садовского. М.: Мир, 1967. С. 91–125.
59. **Drew C. M., Gordon A. S., Knipe R. H., et al.** Metal particle combustion progress report // NWC-TP-4435. Naval Weapons Center, China Lake, CA, 1968.
60. **Prentice J. L., Krauetle K. J.** Metal particle combustion progress report // NWC-TP-4658. Naval Weapons Center, China Lake, CA, 1969.
61. **Bucher P., Yetter R. A., Dryer F. L., et al.** Observations on aluminum particles burning in various oxidizers // 33rd JANNAF Combustion Meeting. V. 2. CPIA Publ. N 653. Laurel, MD, 1996. P. 449–458.
62. **Bucher P., Yetter R. A., Dryer F. L., et al.** Aluminum particle gas-phase flame structure // 34th JANNAF Combustion Meeting. V. 2. CPIA Publ. N 662, Laurel, MD, 1997. P. 295–305.
63. **Bucher P., Yetter R. A., Dryer F. L., et al.** PLIF species and radiometric temperature measurements of aluminum particle combustion in O_2 , CO_2 , and N_2O oxidizers, and comparison with model calculations // 27th Symp. (Intern.) on Combustion. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1998. P. 2421–2429.
64. **Law C. K.** A simplified theoretical model for the vapor-phase combustion of metal particles // *Combust. Sci. Technol.* 1973. V. 7. P. 197–212.
65. **Brooks K. P., Beckstead M. W.** Dynamics of aluminum combustion // *J. Propulsion Power*. 1995. V. 11, N 4. P. 769–780.
66. **King M. K.** Modeling of single particle aluminum combustion in CO_2/N_2 atmospheres // 17th (Intern.) Symp. on Combustion. Pittsburgh, PA: The Combust. Inst., 1977. P. 1317–1328.
67. **Kuo K. K.** Principles of combustion. New York, NY: John-Wiley Sons, Inc., 1986. P. 383–385.
68. **Widener J. F., Beckstead M. W.** Aluminum combustion modeling in solid propellant combustion products // AIAA Paper N 98-3824. 1998.

Поступила в редакцию 18/XII 2004 г.