

УДК 536.46

**ВЛИЯНИЕ ГАЗОДИСПЕРСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА АЭРОВЗВЕСИ НА СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ**© 2023 г. А. Г. Егоров<sup>1\*</sup>, А. С. Тизилев<sup>1</sup><sup>1</sup>Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

\*E-mail: eag@tltsu.ru

Поступила в редакцию 27.06.2022;  
после доработки 14.10.2022;  
принята в печать 20.10.2022

Представлены результаты экспериментальных исследований влияния газодисперсных параметров потока аэровзвеси частиц алюминия: среднего диаметра частиц  $d_{32}$  и коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , на скорость распространения пламени. Получены зависимости видимой скорости распространения пламени,  $u_f$ , от коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  для порошков алюминия марок АСД-1 с  $d_{32} = 17.4$  мкм и АСД-4 с  $d_{32} = 7.4$  мкм. Установлено, что количество максимумов и их расположение на графике зависимости  $u_f(\alpha)$  определяется размером частиц. Для обеих марок порошков в богатой области ( $\alpha \approx 0.2$ ) на графике зависимости  $u_f(\alpha)$  имеется максимум. Для частиц алюминия с  $d_{32} = 17.4$  мкм при увеличении  $\alpha$  скорость распространения пламени монотонно уменьшается. Для частиц с  $d_{32} = 7.4$  мкм имеется второй максимум в области стехиометрических составов аэровзвеси ( $\alpha \approx 1.0$ ). Количество и расположение максимумов и их изменение в зависимости от среднего диаметра  $d_{32}$  позволяет сделать определенные выводы о механизме горения частиц алюминия.

**Ключевые слова:** скорость, пределы распространения пламени, состав, аэровзвесь, режим горения, коэффициент избытка воздуха.

**DOI:** 10.31857/S0207401X23040076, **EDN:** MWUNTF

**ВВЕДЕНИЕ**

Скорость распространения фронта пламени — одна из фундаментальных характеристик горения газовзвесей частиц металлов. Этот параметр используется как в теории горения, так и при решении прикладных задач [1, 2]. Исследование механизма распространения волны горения в потоках газовзвесей частиц энергоемких металлов необходимо для организации эффективных и управляемых рабочих процессов в камерах сгорания энергетических и технологических установок на порошкообразном металлическом горючем. Результаты исследований процессов горения металлов в качестве основного энергоносителя или энергетической добавки в настоящее время широко представлены в многочисленных публикациях, в частности в работах [3–9]. Однако ввиду различий в условиях и методиках проведения экспериментов полученные значения видимой скорости распространения фронта пламени изменяются в пределах от нескольких см/с до 1000 м/с и более [2]. При горении дисперсных металлов в потоке активного газа следует принимать во внимание не только влияние на скорость распространения фронта пламени газодинамических факторов, но

и газодисперсных характеристик газовзвеси, т.е. концентрации и размера частиц.

Известно [5], что одним из наиболее простых и доступных методов повышения реакционной способности порошкообразного металлического горючего, в частности алюминия, является уменьшение размеров его частиц, что способствует повышению удельной поверхности. В связи с чем по мере совершенствования технологий было налажено промышленное производство сферических порошков алюминия марок АСД-1, АСД-4, АСД-6 и др.

Размер частиц является одним из параметров, который оказывает определяющее влияние на скорость распространения фронта пламени в газодисперсных системах. Так, например, для аэровзвеси частиц алюминия с  $d_{32}$  в три раза меньше, чем у АСД-1, скорость распространения пламени  $u_f$  увеличивается в 1.5–2 раза [10].

В работе [11] представлены результаты решения задачи о скорости распространения фронта пламени в аэровзвеси частиц алюминия. Массовая концентрация изменялась в диапазоне 0.07–0.3 кг/м<sup>3</sup>, а диаметр частиц алюминия варьировался в диапазоне от 0.4 до 8 мкм. Результаты расчетов показали, что с увеличением размера частиц видимая скорость горения порошка алюминия в воздухе

стремится к одному и тому же значению независимо от радиуса частиц.

Экспериментально-теоретические исследования процесса распространения пламени по аэрозвеси частиц алюминия представлены в работе [12]. Было установлено, что по мере уменьшения диаметра частиц от микронного до наноразмерного диапазона скорость пламени увеличивается и происходит смена диффузионного режима горения на кинетический. Авторами работы [12] было отмечено, что универсального закона скорости распространения пламени для всего диапазона размеров частиц не существует.

Несмотря на большой объем проведенных исследований, остается открытым вопрос о влиянии концентрации (коэффициента избытка топлива  $\varphi$  или коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ ) на видимую скорость распространения пламени в аэрозвесах частиц алюминия. Если в [12] было показано, что для отношений массы горючего к массе окислителя в интервале значений  $\varphi = 0.65-1$  скорость распространения фронта горения в аэрозвеси частиц алюминия размером 5.4–6.5 мкм практически постоянная и имеет величину 0.22–0.25 м/с, то в [13, 14] экспериментально установлено, что зависимость скорости пламени от концентрации частиц алюминия имеет слабо выраженный максимум.

Установлено, что скорость распространения пламени в аэрозвеси частиц алюминия увеличивается с уменьшением коэффициента избытка воздуха [4]. Результаты экспериментов при давлении меньше 0.1 МПа [5] подтвердили характер зависимости  $u_f(\alpha)$ , когда с уменьшением коэффициента избытка воздуха скорость распространения пламени увеличивается. Дальнейшие испытания при  $p_0 = 0.1$  МПа показали, что  $u_f$  увеличивается в диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха 0.1–0.6 как с уменьшением  $\alpha$ , так и среднего диаметра частиц алюминия.

В работе [10] также было показано, что скорость распространения фронта химической реакции увеличивается при уменьшении коэффициента избытка воздуха от 1.0 до 0.1. Отмечено, что в диапазоне значений 1–1.5 коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  имеет незначительное влияние на скорость распространения пламени.

Если в работах [5, 10] показано, что максимальные значения скорости распространения пламени в богатых аэрозвесах частиц алюминия соответствуют значениям  $\alpha \approx 0.1-0.2$ , а в области стехиометрии при  $\alpha \approx 1.0$  изменения незначительные, то в работе [15] получена зависимость  $u_f(\alpha)$ , на которой показано, что максимальные значения скорости распространения пламени соответствуют значению  $\alpha \approx 1.0$ .

В работе [16] было проведено экспериментальное исследование скорости распространения ла-

минарного пламени в микро- и наноразмерных облаках аэрозвесей частиц алюминия. Получено, что для микрочастиц со средним диаметром  $d_{32} = 6$  мкм был всего один максимум скорости распространения, который соответствовал концентрации 500–600 г/м<sup>3</sup>. Для наночастиц со средним диаметром  $d_{32} = 250$  нм наблюдался еще один максимум при значениях концентрации 850–950 г/м<sup>3</sup>, который авторы объясняют горением мелких агломератов и отдельных частиц. Описанные данные для микрочастиц с  $d_{32} = 6$  мкм не дают полного представления о характере зависимости скорости распространения пламени в диапазоне изменения концентраций 850–950 г/м<sup>3</sup>.

В работе [20] отмечено, что экспериментальные факты, наблюдавшиеся при горении различных газозвесей [16–19, 21] с характерным размером частиц 5–10 мкм, противоречат классическим представлениям теории горения. В указанных работах максимум на кривой зависимости  $u_f(\varphi)$  смещен в область богатых смесей, тогда как согласно классическим представлениям теории горения максимальные значения скорости должны достигаться при стехиометрическом соотношении топлива и окислителя [22]. И что объяснение экспериментально наблюдаемому смещению максимума скорости фронта горения в область богатых топливом смесей следует искать в пространственной неоднородности распределения частиц топлива.

Поскольку известно [23], что поверхностное горение частиц алюминия может происходить как в диффузионной, так и в кинетической области, то необходима дополнительная информация для выявления режима горения. Эту информацию можно получить, анализируя зависимость скорости распространения пламени от величины коэффициента избытка воздуха,  $u_f(\alpha)$ .

Полученные в работах [24, 25] границы устойчивого горения в полидисперсном потоке аэрозвеси частиц алюминия позволили установить характер зависимости  $u_f(\alpha)$ . Установленная зависимость соответствует теоретическим представлениям, согласно которым при значениях  $\alpha \approx 0.2$  и 1.0 при горении аэрозвесей частиц алюминия температура и тепловыделение принимают максимальные значения [4]. В работе [25] на график зависимости  $u_f(\alpha)$  были нанесены экспериментальные значения скорости распространения пламени как для порошка марки АСД-4, так и для АСД-1, поэтому по нему нельзя определить режим горения для частиц алюминия каждой отдельной марки порошка. Для установления режимов, контролирующихся горение частиц алюминия указанных марок порошков со средним диаметром  $d_{32} = 7.4$  и 17.4 мкм, необходимо провести дополнительные исследования. На основе экспериментальных данных можно будет получить зави-

симости  $u_f(\alpha)$  и по ним установить режимы, контролирующие горение порошков марок АСД-4 и АСД-1.

Из проведенного анализа опубликованных работ видно, что в настоящее время у исследователей нет единого мнения о влиянии концентрации и размера частиц алюминия на скорость распространения пламени в аэровзвесах. Экспериментальные работы отличаются как методикой проведения экспериментов, так и анализом полученных данных. Отсутствуют модели, которые позволили бы объяснить экспериментально наблюдаемый факт смещения максимума скорости фронта горения в область газозвесей, богатых топливом. В большинстве опубликованных результатов экспериментальных исследований по распространению пламени по газозвесям микродисперсных частиц алюминия отсутствуют отчетливо выраженные признаки как кинетического режима горения (резкий максимум скорости пламени вблизи стехиометрии), так и диффузионного (монотонный рост скорости пламени с ростом концентрации горючего) [23]. Нет однозначного ответа на вопрос, какой из параметров аэровзвеси определяет характер кривой зависимости  $u_f(\alpha)$ .

В связи с этим требуются дальнейшие исследования процесса распространения пламени в потоке аэровзвеси в широком диапазоне изменения концентраций и размеров частиц алюминия. Настоящая работа является продолжением исследований, результаты которых были представлены в работах [24, 25].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Оборудование и методика испытаний*

Для проведения исследований процессов горения порошкообразного алюминия в потоке воздуха был разработан специальный стенд. Конструкция, а также системы управления и контроля испытательного стенда подробно описаны в работе [3]. Характеристики стенда позволяли получать на входе камеры сгорания экспериментальной установки поток аэровзвеси со следующими параметрами: расход порошка алюминия – 0.003–0.3 кг/с, расход воздуха – 0.01–0.5 кг/с, скорость воздуха – 10–300 м/с, температура воздуха – 293–773 К, давление – 0.1 МПа. Схема экспериментальной установки была приведена в работе [24]. В ней использовалась эжекторная подача порошкообразного алюминия. К камере смешения эжектора крепились сменные цилиндрические обечайки большего диаметра, тем самым образуя канал с внезапным расширением с заданным характерным размером стабилизатора  $H = (D - d_0)$ , где  $D$  – диаметр камеры сгорания,  $d_0$  –

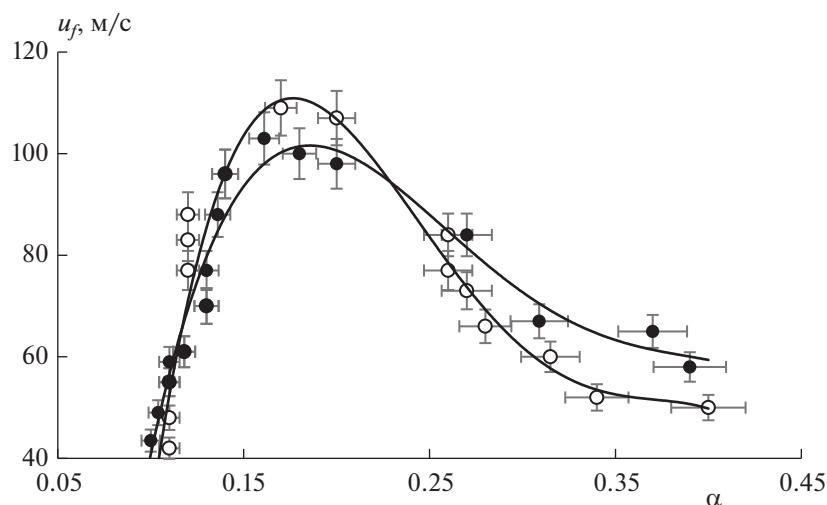
диаметр входного отверстия (диаметр камеры смешения эжектора).

В аэровзвеси в качестве дисперсного материала использовались алюминиевые порошки марок АСД-4, АСД-1, АСД-6, а также алюминий-магниевого сплава марки АМД-50. Для измерения расхода порошка алюминия была разработана специальная система, которая состояла из источника питания, силоизмерительного датчика, электросекундомера, преобразователя и устройства печати. Данная система позволяла измерять расход порошка алюминия с погрешностью ~5%. Методика определения расхода порошка алюминия была такой же, как описанная в [24].

Начальная турбулентность потока аэровзвеси ( $\epsilon_0$ ) на входе в камеру сгорания варьировалась с помощью перфорированных дисков, которые устанавливались в камере смешения эжектора на различных расстояниях от плоскости внезапного расширения. Что позволяло увеличивать уровень начальной турбулентности от трубной,  $\epsilon_0 = 5\%$ , до повышенной,  $\epsilon_0 = 22\%$ .

Для определения скорости распространения фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в настоящей работе использовалась методика, основанная на механизме стабилизации пламени. Поскольку представляется наиболее целесообразным рассматривать механизм стабилизации прежде всего как явление зажигания в потоке на основе тепловой теории. Поэтому с точки зрения развитых в ней положений, в данном случае зажигания от нагретых продуктов горения зоны рециркуляции, границы срыва представляют собой по существу концентрационные границы, но относящиеся к среде, движущейся с заданной скоростью. Данная методика была апробирована ранее в других работах [5, 24, 25]. Так в работе [5] в экспериментах определялась скорость турбулентного горения аэровзвеси частиц алюминия, которая также оценивалась по критическому значению скорости потока аэровзвеси перед стабилизатором.

В настоящей работе использовали следующую методику по определению пределов устойчивого горения. При произвольном расходе воздуха и горючего запускали камеру сгорания, затем отключали свечу зажигания и уменьшали расход алюминия до наступления срыва. После того как расходы порошка и воздуха, соответствующие “бедному” срыву пламени, были зарегистрированы, процесс в камере восстанавливали и при том же самом расходе воздуха увеличивали расход алюминия до достижения “богатого” срыва пламени. Эти циклы повторяли при других значениях расхода и скорости воздуха до тех пор, пока не определился весь диапазон устойчивого горения. После определения границ устойчивого горения и с учетом того, что скорость набегающего на ста-



**Рис. 1.** Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в области богатых составов: ● – АСД-1 ( $d_{32} = 17.4$  мкм), ○ – АСД-4 ( $d_{32} = 7.4$  мкм);  $D = 0.04$  м и  $D = 0.07$  м,  $\epsilon_0 = 5\%$ ,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $T_0 = 293$  К; точки – эксперимент, линия – аппроксимация.

билизатор потока аэровзвеси в момент срыва пламени  $u_{ср}$  равна видимой скорости распространения фронта пламени  $u_f$ , строили зависимость  $u_f(\alpha)$ . На графиках зависимости  $u_f(\alpha)$  каждой точке соответствует как минимум пять измерений. Графики с доверительными интервалами строились и аппроксимировались посредством Excel 2016. Для всех графиков использовалась погрешность, выраженная в процентах.

### Результаты экспериментов

Известно, что для аэровзвеси частиц алюминия, процесс горения которых протекает в кинетическом режиме, зависимость скорости распространения фронта пламени от коэффициента избытка окислителя должна иметь максимум в области стехиометрических составов аэровзвеси. Если же горение частиц контролируется диффузией окислителя к поверхности частицы или к зоне парофазного горения, то в этом случае максимальная скорость распространения фронта пламени достигается при концентрациях горючего, которые в несколько раз могут превышать стехиометрическую [23]. В связи с этим индикатором режима горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия может служить зависимость скорости распространения пламени от коэффициента избытка окислителя. Для получения зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка  $\alpha$  воздуха в потоке аэровзвеси использовали порошки алюминия марок АСД-1 и АСД-4 со средним диаметром частиц  $d_{32} = 17.4$  и  $7.4$  мкм соответственно.

Поскольку выше было отмечено, что в некоторых работах на зависимости  $u_f(\alpha)$  наблюдалось смещение максимума скорости от стехиометрических в область богатых составов аэровзвесей, то в первую очередь были проведены исследования влияния концентрации и размера частиц на скорость распространения пламени в потоках богатых и стехиометрических составов.

Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в области богатых составов представлено на рис. 1. Из этого рисунка видно, что максимальные значения скорости распространения пламени для обеих марок порошков соответствуют  $\alpha \approx 0.2$ .

Увеличение скорости распространения пламени для частиц алюминия марки АСД-4 в диапазоне значений  $\alpha \approx 0.1-0.2$  объясняется ростом температуры за счет реакции азотирования. Температура продуктов сгорания в этом случае составляет  $\sim 2400$  К [26] и вдвое превосходит температуру воспламенения частиц алюминия. Можно предположить, что для порошка марки АСД-1 со средним размером частиц  $d_{32} = 17.4$  мкм рост скорости распространения пламени обусловлен радиационным механизмом горения [27, 28]. Поскольку порошок АСД-1 представляет собой полидисперсную систему, то при преимущественно радиационном переносе тепла воспламенение крупных частиц наступает раньше. Это приводит к быстрому разогреву системы и увеличению скорости распространения пламени.

С увеличением коэффициента избытка воздуха  $\alpha > 0.2$  наблюдается снижение скорости пламени как для аэровзвеси с АСД-4, так и с АСД-1.

Причем падение скорости распространения пламени для частиц с  $d_{32} = 7.4$  мкм происходит резко из-за снижения температуры, поскольку при  $\alpha > 0.2$  реакция азотирования прекращается. Так как горение частиц с  $d_{32} = 17.4$  мкм контролируется диффузией, то снижение температуры для них не столь критично и скорость распространения пламени снижается не столь резко.

Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия в области стехиометрических составов представлено на рис. 2. Из этого рисунка видно, что для частиц алюминия марки АСД-4 с  $d_{32} = 7.4$  мкм, как и для газовых смесей, график зависимости  $u_f(\alpha)$  имеет максимум вблизи стехиометрии при  $\alpha \approx 1.0$ . Поэтому можно предположить, что горение частиц алюминия с  $d_{32} = 7.4$  мкм контролируется кинетикой химических реакций. Поскольку известно, что если горение частиц алюминия протекает в кинетическом режиме, то зависимость скорости пламени от коэффициента избытка воздуха должна иметь максимум в области стехиометрических составов аэровзвеси [23].

Для частиц алюминия с  $d_{32} = 17.4$  мкм скорость распространения пламени вблизи стехиометрии практически не изменяется. Что соответствует данным, представленным в работах [5, 10], где показано, что максимальные значения скорости распространения пламени в богатых аэровзвесах частиц алюминия марки АСД-1 соответствуют значениям  $\alpha \approx 0.1-0.2$ , а в области стехиометрических составов при  $\alpha \approx 1.0$  изменения незначительные.

Известно, что определить основной механизм передачи тепла в предпламенную зону можно, анализируя экспериментальные зависимости скорости распространения пламени от размера частиц [23]. В настоящей работе при использовании полученных экспериментальных данных была построена зависимость скорости распространения пламени  $u_f$  от обратного диаметра частиц  $1/d_{32}$ , которая представлена на рис. 3. Из этого рисунка видно, что полученная зависимость скорости распространения пламени от обратного диаметра частиц алюминия является линейной. Вероятно, что эта зависимость, так же как и для нормальной скорости [23, 29], является следствием диффузионного режима горения частиц алюминия.

Полученное противоречие может быть устранено, если предположить, что при атмосферном давлении в кислородсодержащих средах с уменьшением размера частиц режим их горения изменяется от контролируемого диффузией к контролируемому кинетикой поверхностных химических реакций. Это предположение косвенно подтверждают оценки характерных времен диф-

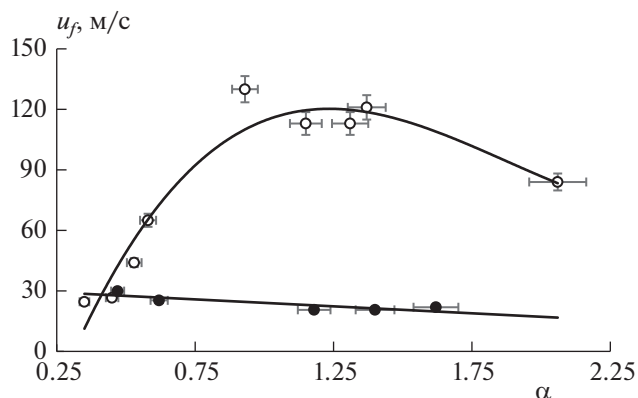


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в области стехиометрических составов. Обозначения и условия те же, что и для рис. 1.

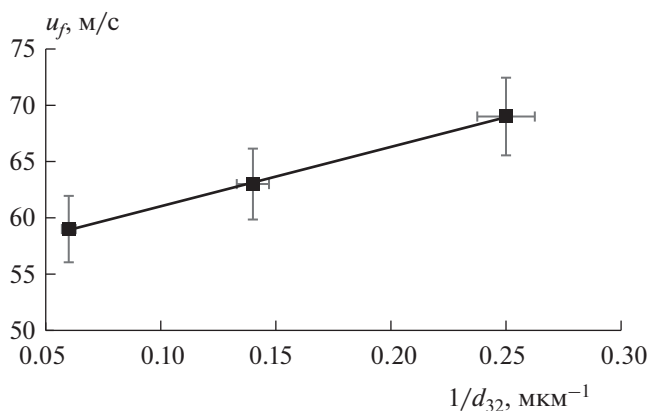
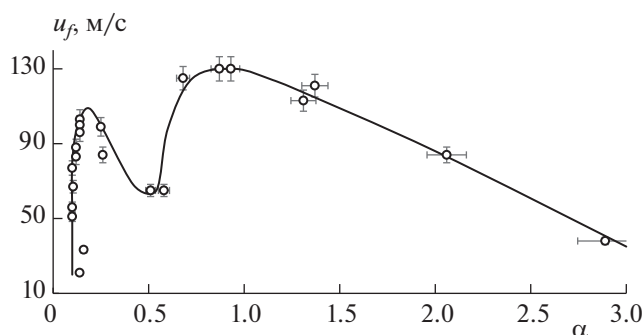


Рис. 3. Зависимость скорости распространения пламени от диаметра частиц при  $\alpha = 0.14$ ,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $T_0 = 293$  К; точки – эксперимент, линия – аппроксимация.

фузии реагентов и газофазных химических реакций [30].

На основе данных, представленных на рис. 1, 2, можно сделать вывод о том, что для аэровзвеси частиц алюминия с  $d_{32} = 7.4$  мкм, процесс горения которых протекает в кинетическом режиме, зависимость  $u_f(\alpha)$  должна иметь два максимума: один в области стехиометрических составов, второй – в области богатых составов. Для частиц с  $d_{32} = 17.4$  мкм, горение которых контролируется диффузией окислителя к поверхности частицы или к зоне парофазного горения, зависимость  $u_f(\alpha)$  имеет один максимум, и он должен находиться в области богатых составов.

Результаты, представленные на рис. 1, 2, а также данные, опубликованные в работах [3–5, 16–19],



**Рис. 4.** Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени. Порошок алюминия марки АСД-4 с  $d_{32} = 7.4$  мкм,  $D = 0.04\text{--}0.08$  м,  $\epsilon_0 = 5\%$ ,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $T_0 = 293\text{--}523$  К; точки — эксперимент; линия — аппроксимация.

получены в узком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха и не дают полного представления о характере всей зависимости  $u_f(\alpha)$ . Для получения ясности в данном вопросе необходимо иметь экспериментальные данные в более широком диапазоне изменения  $\alpha$ . С этой целью был проведен большой цикл испытаний в камерах сгорания разного диаметра с широким варьированием начальных параметров потока аэрозвеси.

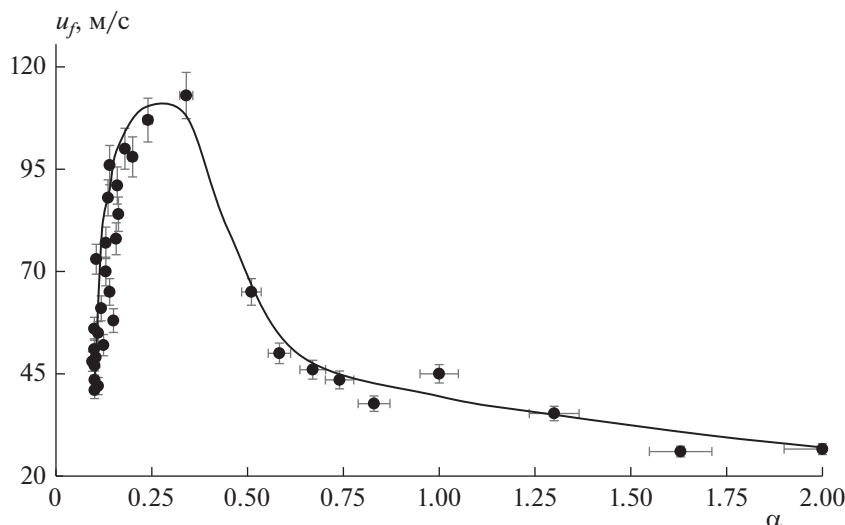
На рис. 4 показано влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-4 в диапазоне изменений  $\alpha = 0.1\text{--}3.0$ . Из этого рисунка видно, что график зависимости  $u_f(\alpha)$  имеет два максимума: один в богатой, второй — в стехиометрической области составов аэрозвеси. В богатой области резкий рост скорости распространения пламени достигает своих максимальных величин при значениях  $\alpha \approx 0.2$ . Увеличение скорости распространения фронта пламени при данных значениях  $\alpha$  происходит за счет увеличения температуры при протекании экзотермической реакции азотирования [26]. Второй максимум скорости распространения пламени на кривой зависимости  $u_f(\alpha)$  соответствует значению  $\alpha \approx 1.0$ ; он также обусловлен ростом температуры [4]. При дальнейшем обеднении смеси скорость распространения фронта пламени уменьшается. Таким образом, для порошка алюминия марки АСД-4 со средним диаметром частиц  $d_{32} = 7.4$  мкм, горение которых протекает в кинетическом режиме, зависимость  $u_f(\alpha)$  соответствует теоретическим представлениям, согласно которым при значениях  $\alpha \approx 0.2$  и  $1.0$  в аэрозвесях частиц алюминия тепловыделение, температура и скорость распространения фронта пламени принимают максимальные значения [4, 24–26].

Данные, представленные на рис. 4, говорят о том, что характер зависимости скорости распространения турбулентного фронта пламени от коэффициента избытка воздуха в потоке аэрозвеси частиц микронного размера с  $d_{32} = 7.4$  мкм качественно совпадает с характером зависимости скорости распространения ламинарного пламени от концентрации в облаке аэрозвесей наноразмерных частиц алюминия с  $d_{32} = 250$  нм. Вероятнее всего, авторы работ [16–19] также получили бы вторые локальные максимумы для частиц алюминия микронного размера с  $d_{32} \approx 6$  мкм при исследовании горения в облаках аэрозвесей в диапазоне концентраций  $850\text{--}950$  г/м<sup>3</sup>.

На рис. 5 показано влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-1 в диапазоне изменений  $\alpha = 0.1\text{--}2.0$ . Из этого рисунка видно, что на графике зависимости  $u_f(\alpha)$  имеется один максимум, который соответствует значению коэффициента избытка воздуха  $\alpha \approx 0.2$ . Поскольку частицы алюминия марки АСД-1 со средним размером  $d_{32} = 17.4$  мкм реагируют в воздухе при атмосферном давлении в диффузионном режиме, то при увеличении массовой концентрации увеличивается суммарная площадь поверхности частиц. В связи с чем наблюдается интенсификация процессов лучистого переноса тепла между частицами, приводящая к соответствующему увеличению скорости распространения фронта пламени [17]. В работе [31] отмечено, что радиационные эффекты могут играть если не ведущую, то весьма существенную роль в процессах волнового горения газозвесей частиц металлов.

Таким образом, из рис. 4, 5 видно, что для обеих марок порошков в области богатых составов ( $\alpha \approx 0.2$ ) на графике зависимости  $u_f(\alpha)$  имеется максимум. Для частиц алюминия марки АСД-1, горящих в диффузионном режиме, с увеличением коэффициента избытка воздуха скорость распространения пламени монотонно уменьшается. Это говорит о слабой (неэкспоненциальной) зависимости скорости горения от температуры. Для частиц алюминия марки АСД-4, реагирующих в кинетическом режиме (скорость горения существенно зависит от температуры), график зависимости  $u_f(\alpha)$  имеет второй максимум в области стехиометрических составов ( $\alpha \approx 1.0$ ).

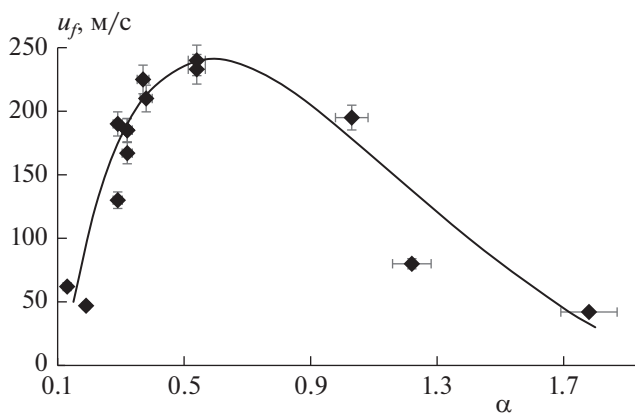
Известно, что посредством целенаправленного воздействия на поверхностную оксидную пленку можно изменить макрокинетику воспламенения и горения индивидуальных частиц алюминия [5]. Одним из методов модификации является объемная активация алюминия различными металлами, в частности магнием. Для алюминиево-магниевых сплавов наблюдается снижение температурных и концентрационных пределов



**Рис. 5.** Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени. Порошок алюминия марки АСД-1 с  $d_{32} = 17.4$  мкм,  $D = 0.04\text{--}0.08$  м,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $\varepsilon_0 = 5\%$ ,  $T_0 = 293\text{--}523$  К; точки – эксперимент, линия – аппроксимация.

воспламенения по сравнению с чистым алюминием. Данное обстоятельство, вероятно, должно отразиться и на характере зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха в потоке аэровзвеси с частицами алюминий-магниевого сплава.

Для проведения исследований и получения зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха был выбран порошок алюминий-магниевого сплава марки АМД-50, частицы которого содержали 50% Al + 50% Mg. Средний диаметр основной фракции порошка АМД-50 составлял  $d_{32} = 10$  мкм.

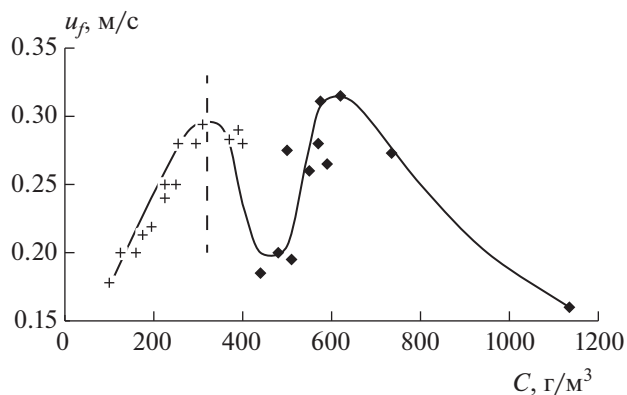


**Рис. 6.** Зависимость скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха. Порошок сплава АМД-50 с  $d_{32} = 10$  мкм,  $D = 0.04$  м,  $\varepsilon_0 = 5\%$ ,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $T_0 = 293$  К; точки – эксперимент, линия – аппроксимация.

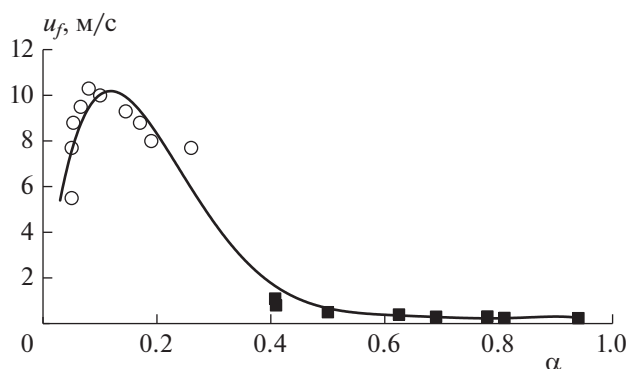
На рис. 6 представлена зависимость  $u_f(\alpha)$  в потоке аэровзвеси с АМД-50 в диапазоне изменения  $\alpha = 0.1\text{--}1.8$ . Из этого рисунка видно, что в потоке аэровзвеси с АМД-50 максимальное значение скорости распространения пламени соответствует  $\alpha \approx 0.5$ , тогда как в потоке с частицами алюминия оно зафиксировано при  $\alpha \approx 0.2$ . Вероятно, это обстоятельство обусловлено двухстадийностью процесса горения алюминий-магниевого сплава, когда на первоначальной стадии из частицы выгорает в основном магний. Горение алюминий-магниевого сплава существенно отличается от горения как алюминия, так и магния и сильно зависит от соотношения компонентов в сплаве и параметров окислительной среды [32].

В работе [2] было отмечено, что общий характер зависимостей скорости распространения пламени от концентрации для чистых металлов алюминия и магния согласуется с данными, полученными ранее другими исследователями. В отличие от чистых металлов для аэровзвеси частиц алюминий-магниевого сплава максимальное значение скорости было зарегистрировано при концентрации частиц алюминия  $c = 0.4$  кг/м<sup>3</sup>.

Если для АСД-4 со средним диаметром частиц  $d_{32} = 7.4$  мкм на графике зависимости  $u_f(\alpha)$  имеется второй максимум при  $\alpha \approx 1.0$ , то для АМД-50 с  $d_{32} = 10$  мкм он отсутствует. Это можно объяснить тем, что для частиц сплава АМД-50 со средним диаметром  $d_{32} \approx 10$  мкм происходит смена с кинетического режима горения на контролируемый



**Рис. 7.** Зависимость скорости распространения пламени от концентрации: + – порошок алюминия с  $d_{32} = 6$  мкм данные [18]; ◆ – порошок алюминия с  $d_{32} = 6$  мкм данные [16]; сплошная линия – аппроксимация, штриховая линия – стехиометрический состав.



**Рис. 8.** Зависимость скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха для порошка АСД-1 с  $d_{32} = 17.4$  мкм: o – данные [26], ■ – данные [1].

диффузией, т.е. реализуется переходный режим горения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявленный в настоящей работе характер зависимости скорости распространения пламени от газодисперсных параметров позволяет правильно интерпретировать результаты исследований, полученные как в потоках, так и в неподвижных аэрозвесах частиц алюминия.

На рис. 7 показана аппроксимация экспериментальных данных по зависимости скорости распространения пламени в облаках аэрозвесей частиц алюминия с  $d_{32} = 6$  мкм от концентрации, полученных в работах [16, 18]. Из этого рисунка видно, что зависимость скорости распростране-

ния ламинарного пламени от концентрации в неподвижном облаке аэрозвеси качественно коррелируют с характером зависимости  $u_f(\alpha)$  в турбулентном потоке аэрозвеси частиц алюминия марки АСД-4 с  $d_{32} = 7.4$  мкм.

Из рис. 7 также видно, что на кривой зависимости скорости распространения пламени от концентрации,  $u_f(C)$ , тоже имеется два максимума. Максимум скорости распространения пламени в области стехиометрических составов ( $C \approx 320$  г/м<sup>3</sup>), полученный в работе [18], соответствует классическим представлениям теории горения. Согласно этой теории резкий максимум скорости горения аэрозвеси в области стехиометрических составов указывает на кинетический режим горения частиц алюминия с  $d_{32} = 6$  мкм. Известно, что в тех случаях, когда горение частиц горючего контролируется кинетикой химических реакций, максимум скорости пламени, как и в газах, находится в области стехиометрических составов [23]. Второй максимум на кривой зависимости  $u_f(C)$  в области богатых составов, полученный авторами [16], обусловлен ростом температуры за счет реакции азотирования [26], поскольку для частиц, реагирующих в кинетическом режиме, скорость распространения пламени существенно зависит от температуры.

Учитывая то обстоятельство, что в последние годы получено достаточно много экспериментальных результатов по определению закона горения микродисперсных частиц алюминия, позволяющих утверждать, что в области размеров  $d_{32} < 10$  мкм происходит смена режима горения [23], можно предположить, что и частицы алюминия марки АСД-4 с  $d_{32} = 7.4$  мкм также реагируют в кинетическом режиме. Таким образом, можно сделать вывод, что для частиц алюминия с  $d_{32} < 10$  мкм, горение которых протекает в кинетическом режиме и скорость горения которых существенно зависит от температуры, зависимость скорости распространения пламени от концентрации должна иметь два максимума: первый – в области богатых составов, второй – в области стехиометрических.

Известно [23], что сдвиг максимума скорости в область богатых смесей и слабое изменение скорости горения в окрестности стехиометрии присущи диффузионному режиму горения частиц алюминия. На рис. 8 представлена аппроксимация экспериментальных данных полученных в работах [1, 26] для порошка алюминия марки АСД-1 с  $d_{32} = 17.4$  мкм. В данном случае, когда горение контролируется диффузией окислителя к поверхности частицы или к зоне парофазного го-



рения, зависимость  $u_f(\alpha)$  имеет один максимум в области богатых смесей при значениях  $\alpha \approx 0.2$ .

Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, позволили выявить характер зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха в потоках аэровзвесей, содержащих порошки марок АСД-4 и АСД-1. Установлено, что характер зависимости  $u_f(\alpha)$  определяется режимом горения аэровзвеси, который, в свою очередь, зависит от размера частиц алюминия. Для частиц алюминия марки АСД-4 с  $d_{32} = 7.4$  мкм, горение которых контролируется кинетикой химических реакций и сильно зависит от температуры, максимальные значения скорости распространения пламени соответствуют значениям коэффициента избытка воздуха  $\alpha \approx 0.2$  и 1.0. Для частиц алюминия марки АСД-1 с  $d_{32} = 17.4$  мкм, горение которых протекает в диффузионном режиме и слабо зависит от температуры, зависимость  $u_f(\alpha)$  имеет один максимум скорости распространения пламени, соответствующий значению  $\alpha \approx 0.2$ .

Получено, что для частиц сплава АМД-50 со средним диаметром  $d_{32} = 10$  мкм на графике зависимости  $u_f(\alpha)$  имеется один максимум, который соответствует значению коэффициента избытка воздуха  $\alpha \approx 0.5$ . Данный факт объясняется характерными особенностями горения АМД-50 и сменной кинетического режима горения на контролируемый диффузией, т.е. реализуется переходный режим горения, обусловленный размером частиц алюминиево-магниевого сплава.

Выявленные закономерности влияния газодисперсных параметров потока аэровзвеси частиц алюминия на скорость распространения пламени можно использовать для построения корректных физических моделей горения и правильной интерпретации экспериментальных данных. Они также могут найти практическое применение при организации рабочего процесса и разработке методов и средств управления процессом сгорания дисперсного алюминия в камерах энергетических и технологических установок.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронцов А.В., Крылов В.И., Арефьев К.Ю., Гусев А.А. // Инж. журн.: наука и инновации. 2017. № 1(61). С. 2.
2. Алексеев А.Г., Судакова И.В. // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19. № 5. С. 34.
3. Егоров А.Г. Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах реактивных двигательных установок. Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2004.
4. Малинин В.И. Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. Екатеринбург–Пермь: УрО РАН, 2006.
5. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
6. Махов М.Н. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 71; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20090083>
7. Коротких А.Г., Сорокин И.В., Селихова Е.А., Архипов В.А. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 7. С. 32; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20070080>
8. Шмелев В.М. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 8. С. 75; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20080099>
9. Вадченко С.Г., Алымов М.И. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 22; <https://doi.org/10.31857/S0207401X2203013X>
10. Кудрявцев В.М., Сухов А.В., Воронцов А.В., Пеньков С.Н. // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. Вып. 4. Харьков: ХАИ, 1986. С. 66.
11. Моисеева К.М., Крайнов А.Ю., Дементьев А.А. // Физика горения и взрыва. 2019. Т. 55. № 4. С. 26.
12. Huang Y., Risha G.A., Yang V., Yetter R.A. // Combust. and Flame. 2009. V. 156. № 1. P. 5.
13. Афанасьев С.Н., Жарков В.Ю., Озеров Е.С. // Физика аэродисперсных систем. Вып. 27. Киев, Одесса: Вища шк., 1985. С. 39.
14. Goroshin S., Palečka J., Berghorson J. // Prog. Energy Combust. Sci. 2022. V. 91. 100994; <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2022.100994>
15. Кудрявцев В.М., Сухов А.В., Воронцов А.В., Шпара А.П. // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 6. С. 49.
16. Vocanegra E.P., Sarou-Kanian V., Davidenko D., Chauveau C., Gökalp I. // Prog. Propulsion Phys. 2009. V. 1. P. 47.
17. Risha G.A., Huang Y., Yetter R.A., Yang V. // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2005. AIAA Paper 2005-739.
18. Бойчук Л.В., Шевчук В.Г., Швец А.И. // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 6. С. 51.
19. Goroshin S., Fomenko I., Lee J.H.S. // Proc. 26th Sympos. (Intern.) on Combust. V. 26. Pittsburgh: The Combust. Inst. 1996. 2. P. 1961.
20. Гринчук П.С. // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 32.
21. Kobayashi H., Ono N, Okuyama Y., Niioka T. // Proc. 25th Sympos. (Intern.) on Combustion. V. 25. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1994. P. 1693.
22. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: Наука, 1965.
23. Полетаев Н.И. // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52 № 6. С. 60.
24. Тизлов А.С., Егоров А.Г. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 3. С. 35.

25. *Егоров А.Г.* // Физика горения и взрыва. 2020. Т. 56. № 1. С. 48.
26. *Ягодников Д.А., Сухов А.В., Малинин В.И., Кирьянов И.М.* // Вестн. МГТУ. "Сер. Машиностроение". 1990. № 1. С. 121.
27. *Озерова Г.Е., Степанов И.М.* // Физика горения и взрыва. 1973. Т. 5. № 2. С. 627.
28. *Тодес О.М., Гольцикер А.Д., Ионушас К.К.* // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10. № 1. С. 83.
29. *Агеев Н.Д., Горошин С.В., Золотко А.Н., Полетаев Н.И., Шошин Ю.Л.* // Горение гетерогенных и газовых систем. Матер. IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черногловка: ОИХФ АН СССР, 1989. С. 83.
30. *Полетаев Н.И.* Пылевые пламена металлов: получение, свойство, применение. Дис. ... д-ра физ-мат. наук. Одесса: ОНУ им. И.И. Мечникова, 2013.
31. *Ярин Л.П.* Основы теории горения двухфазных сред. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
32. *Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашипов Л.Я.* Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977.