

УДК 536.46

О СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

А. Г. Егоров

Тольяттинский государственный университет, 445667 Тольятти, eag@tltsu.ru

Экспериментально определены границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в широком диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха ($0.1 \div 2.0$). Выявлена характерная особенность зависимости скорости срыва пламени от коэффициента избытка воздуха: зависимость имеет два максимума. С учетом принципа механизма стабилизации пламени, основанного на равенстве скорости потока, при которой происходит срыв пламени, и скорости распространения фронта пламени, сделан вывод о наличии двух максимумов на зависимости скорости фронта от коэффициента избытка воздуха, которые соответствуют максимальным значениям тепловыделения и температуры горения аэровзвеси частиц алюминия при коэффициенте избытка воздуха 0.2 и 1.0. Ранее эти максимумы были получены другими исследователями в термодинамических расчетах.

Ключевые слова: аэровзвесь, алюминий, поток, стабилизация пламени, скорость распространения пламени.

DOI 10.15372/FGV20200105

ВВЕДЕНИЕ

Известно [1–3], что в камерах сгорания двигательных и технологических установок горение реализуется, как правило, в турбулентных потоках газовзвесей. Поэтому определение фундаментальных характеристик горения, например скорости распространения пламени и пределов устойчивого горения, необходимо как для подтверждения достоверности той или иной модели турбулентного горения, так и для обоснования способов организации рабочего процесса в этих установках.

В настоящее время недостаточно экспериментальных данных по горению газовзвесей частиц алюминия в турбулентном потоке воздуха для того, чтобы сделать однозначный вывод о характере зависимости скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха в широком диапазоне его изменения.

Если характер зависимости скорости пламени u_f от коэффициента избытка воздуха α для стационарных ламинарных, предварительно перемешанных потоков аэровзвесей частиц алюминия определен [4], то для турбулентных потоков по данному вопросу ясности пока нет. Поскольку опубликованные экспериментальные данные [1–3] по пределам устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия

получены при низких скоростях потока либо в узком диапазоне коэффициента избытка воздуха, не удается однозначно определить по ним скорость распространения пламени в области $\alpha \geq 1$.

Термодинамический анализ горения металлов в воздухе, проведенный в [1], выявил увеличение температуры продуктов сгорания и тепловыделения при $\alpha \approx 0.2$ и 1.0, что согласуется с результатами термохимического анализа. Влияние коэффициента избытка воздуха на тепловыделение и температуру горения различных металлов и углеводородного горючего иллюстрирует рис. 1. Представленные результаты расчетов указывают на то, что зависимость скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха должна иметь два максимума при указанных значениях α . Между тем в [2, 5, 6] на зависимости $u_f(\alpha)$ присутствует только один максимум при $\alpha \approx 0.2$.

В [1] показано, что с уменьшением коэффициента избытка воздуха скорость распространения пламени возрастает. Это происходит вследствие увеличения объемной концентрации частиц и объемного тепловыделения, что приводит к увеличению кондуктивных и радиационных тепловых потоков, идущих на нагрев исходной газовзвеси. В [2] экспериментально установлено, что в богатых алюминиево-воздушных смесях при распространении вол-

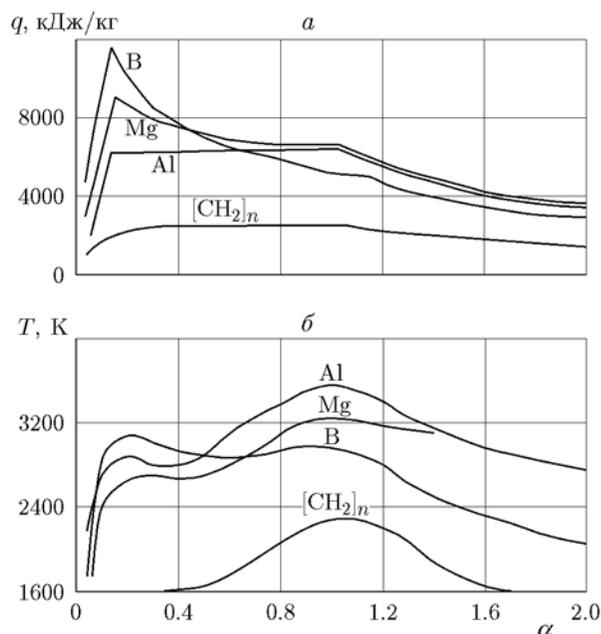


Рис. 1. Влияние коэффициента избытка воздуха на тепловыделение (а) и термодинамическую температуру (б) [1] ($p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К)

ны горения происходит автотурбулизация потока, которая приводит к искривлению фронта пламени и увеличению его скорости. При низких коэффициентах избытка воздуха скорость распространения пламени в аэровзвесах частиц алюминия увеличивается, а при составах смеси, близких к стехиометрическому, — уменьшается.

Смещение максимальных значений скорости распространения пламени на графике зависимости $u_f(\alpha)$ в сторону низких значений α объясняется экзотермической реакцией азотирования металлов и особенностями процессов тепло- и массообмена в богатых металловоздушных смесях. Сопровождаемый экзотермическим эффектом процесс образования конденсированного нитрида алюминия AlN вносит существенный вклад в суммарное тепловыделение и поддерживает устойчивое воспламенение и горение обедненной кислородом смеси [1].

Зависимость $u_f(\alpha)$ для аэровзвеси частиц магния (порошок МПФ) и алюминия (АСД-4), полученная в [5], представлена на рис. 2. Для сравнения на этом же рисунке отображена аналогичная зависимость для аэровзвеси капель углеводородного горючего [7].

Подобные зависимости $u_f(\alpha)$ были получе-

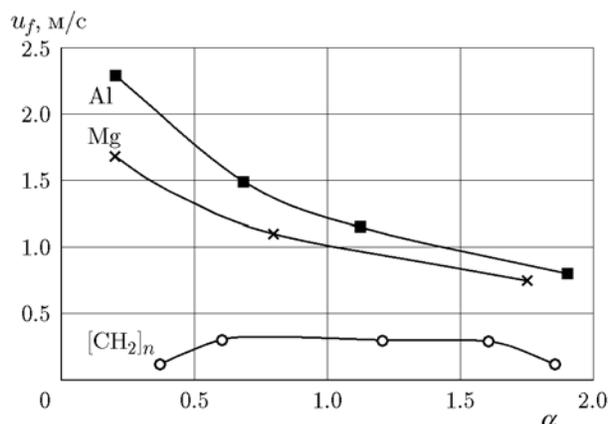


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на скорость распространения пламени [5, 7] ($p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 300$ К)

ны в [2, 6, 8] для аэровзвесей порошков алюминия марок АСД-1 со средним размером частиц $d_{32} = 17.4$ мкм и АСД-4 с $d_{32} = 7.4$ мкм.

Таким образом, в [1, 2, 6, 8] показано, что скорость распространения пламени в аэровзвесах частиц алюминия по мере уменьшения коэффициента избытка воздуха до значений $\alpha \approx 0.1 \div 0.2$ возрастает, а при увеличении коэффициента до значений $\alpha \approx 1.0$ — уменьшается.

Вместе с тем имеются экспериментальные работы, в которых отмечается увеличение скорости распространения пламени с приближением коэффициента избытка воздуха к значению $\alpha \approx 1.0$. Так, в [9] приведена зависимость $u_f(\alpha)$, полученная для аэровзвеси частиц алюминия с $d_{32} = 35$ мкм при давлении $2 \div 3$ МПа. На ней максимальные значения u_f соответствуют $\alpha \approx 1.0$ и с увеличением α в диапазоне $1 \div 5$ значения u_f уменьшаются.

Известно [2], что для двигательных установок, в которых окислитель поступает из окружающей среды, одним из определяющих параметров является скорость распространения пламени, влияющая на пределы устойчивого горения и выбор конкретной схемы стабилизации пламени.

В [1] устойчивость фронта пламени в турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия осуществлялась методом газодинамической стабилизации, посредством поперечного вдува в форкамеру встречных струй воздуха.

По результатам испытаний в [1] построены области устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия с АСД-4 и АСД-1. Границы устойчивого горения определены в уз-

ких пределах как по скорости набегающего потока аэровзвеси ($u_0 = 1.0 \div 40$ м/с), так и по ее составу ($\alpha = 0.04 \div 0.3$). Максимальные скорости потока аэровзвеси, при которых происходил срыв фронта пламени, наблюдались при $\alpha = 0.1 \div 0.2$.

В [2] приведена схема организации рабочего процесса в прямооточной камере сгорания со стабилизацией фронта пламени плохообтекаемым телом. Результаты экспериментальных исследований границ устойчивого горения представлены на рис. 3, на котором полученные данные аппроксимированы прямой линией. Как следует из рисунка, скорости набегающего потока аэровзвеси на стабилизатор также были невысокими (≈ 15 м/с), однако диапазон составов аэровзвеси был несколько шире ($\alpha \approx 0.12 \div 1.0$). Из рис. 3 видно, что максимальная скорость потока, при которой происходит срыв пламени ($u_{ср}$), также находится в области богатых по составу аэровзвесей, т. е. при $\alpha \approx 0.2 \div 0.4$.

Авторами [2] сделано предположение, что характерной особенностью стабилизации фронта пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия является слабая зависимость $u_{ср}$ (следовательно, и скорости пламени) от коэффициента избытка воздуха α , что свидетельствует о преобладающем влиянии гидродинамических параметров потока на характеристики турбулентного горения аэровзвеси.

В [3] реализован процесс стабилизации пламени в турбулентном потоке аэровзвеси частиц алюминия с помощью зоны рециркуляции,

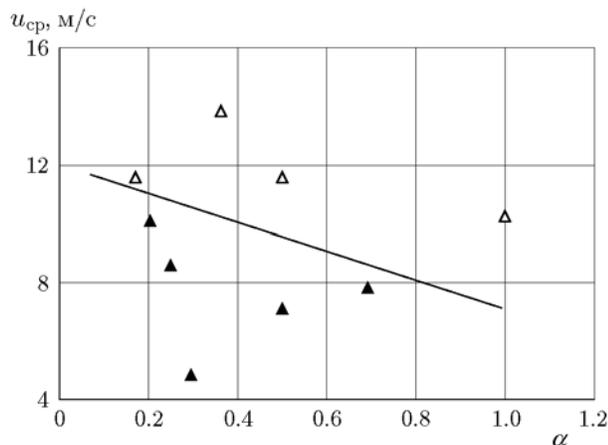


Рис. 3. Зависимость скорости срыва пламени от коэффициента избытка воздуха [2] (порошок АСД-1, $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293$ К)

возникающей при внезапном расширении осесимметричного канала. Влияние характерного размера стабилизатора H на устойчивость горения иллюстрирует рис. 4. Максимальная скорость потока при срыве фронта пламени в этом случае также зафиксирована при $\alpha \approx 0.2$. Видно, что зависимость $u_{ср}(\alpha)$ не является линейной и при $\alpha \approx 0.2$ имеет ярко выраженный максимум.

Представленные на рис. 3 и 4 экспериментальные данные показывают, что полученные в [3] результаты не согласуются с данными и предположением авторов [2] о слабой зависимости скорости срыва от коэффициента избытка воздуха.

Таким образом, с одной стороны, отмеченные в [1–3] значения максимальной скорости потока при срыве пламени совпадают с максимальными значениями скорости распространения пламени в аэровзвесах частиц алюминия при $\alpha \approx 0.2$ [5, 6, 10]. С другой стороны, результаты термодинамических расчетов влияния коэффициента избытка воздуха на тепловыделение и термодинамическую температуру предполагают наличие второго максимума на кривой зависимости $u_f(\alpha)$ — при $\alpha \approx 1.0$, который, соответственно, также должен присутствовать на зависимости $u_{ср}(\alpha)$.

Установленные в [1–3] пределы устойчиво-

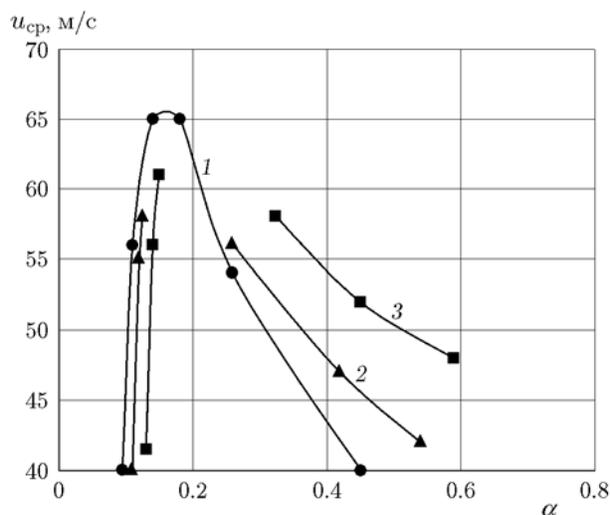


Рис. 4. Влияние состава смеси и характерного размера стабилизатора на устойчивость горения [3]:

порошок АСД-1, $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293$ К; 1 — $D = 0.04$ м ($H = 0.02$ м), 2 — $D = 0.05$ м ($H = 0.03$ м), 3 — $D = 0.08$ м ($H = 0.04$ м)

го горения, полученные в узких диапазонах α , а также противоречивая интерпретация экспериментальных данных в [2, 3] не дают ясно и полного представления о пределах стабилизации пламени в потоке аэрозвесей частиц алюминия при $\alpha \geq 1.0$. Следовательно, на сегодняшний день опубликованных данных по пределам устойчивого горения в турбулентных потоках аэрозвесей частиц алюминия в стехиометрических и бедных составах недостаточно, для того чтобы сделать однозначный вывод о характере зависимости скорости распространения пламени в области $\alpha \geq 1$.

В [4] также отмечалось, что 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).

Поэтому возникла необходимость проведения дальнейших исследований по определению пределов устойчивого горения в потоках аэрозвесей частиц алюминия в диапазоне составов с $\alpha \approx 0.1 \div 2.0$. Определив границы устойчивого горения и построив зависимость $u_{\text{ср}}(\alpha)$, с учетом того факта, что скорость набегающего на стабилизатор потока аэрозвеси в момент срыва фронта пламени $u_{\text{ср}}$ равна скорости распространения пламени u_f , можно будет установить зависимость $u_f(\alpha)$ в указанном диапазоне α .

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Источником сжатого воздуха на стенде служила батарея из 20 баллонов емкостью 40 л каждый, установленных на одной рампе. Измерение расхода воздуха осуществлялось на стандартном мерном участке с диаметром трубопровода 50 мм с установленной в нем диафрагмой диаметром 15 мм. Погрешность измерения расхода воздуха составляла $\approx 5\%$.

Для проведения экспериментов с подогревом воздуха использовался теплообменник, представляющий собой обечайку, внутри которой находился участок воздухопровода, изготовленный из нержавеющей стали и выполненный в форме змеевика. В заднюю торцевую

стенку обечайки была вмонтирована горелка. Высокотемпературные продукты сгорания нагревали змеевик и воздух, проходящий через него, а затем удалялись через отверстие в противоположной торцевой стенке обечайки. Таким образом, нагрев воздуха проводился без балластирования его продуктами сгорания.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.

В данной установке использовалась эжекторная подача порошкообразного алюминия. Под действием разрежения, создаваемого активной струей воздуха, истекающей из сопла эжектора 1, алюминиевый порошок из бункера 3 через заборную трубку 2 подается в приемную камеру эжектора 4. Из приемной камеры порошок алюминия попадает в камеру смешения эжектора 5, там он перемешивается с активной струей воздуха, образуя аэрозвесь, которая затем поступает в камеру сгорания 6.

Источником зажигания служила электрическая свеча 8, которая устанавливалась за плоскостью внезапного расширения. Расходы воздуха и порошка алюминия регулировались при помощи кранов с электроприводом 9, 10.

В зависимости от поставленных задач и цели эксперимента, подогретый или холодный воздух через сопло поступал в камеру смешения эжектора.

К камере смешения эжектора крепились сменные цилиндрические обечайки большего диаметра, образующие канал с внезапным расширением с заданной степенью расширения $\bar{r} = D/d_0$ и характерным параметром стабилизатора $H = D - d_0$, где D — диаметр камеры сгорания, d_0 — диаметр входного отверстия (диаметр эжектора).

Получаемые таким образом модели камер сгорания представляли собой осесимметричные каналы длиной $L = 0.1 \div 0.3$ м, диаметром $D = 0.04 \div 0.08$ м с диаметром входного отверстия $d_0 = 0.02$ или 0.04 м. Относительная длина L/d_0 изменялась от 5.5 до 8.0, а степень внезапного расширения варьировалась в диапазоне $\bar{r} = 2.0 \div 4.0$. В аэрозвеси в качестве дисперсного материала использовались алюминиевые порошки марок АСД-4, АСД-1, ПА-4, а также порошок алюминиево-магниевого сплава ПАМ-4, выпускаемые отечественной промышленностью и соответствующие отраслевому стандарту и техническим условиям на их дисперсный состав.

Для измерения расхода порошка алюми-

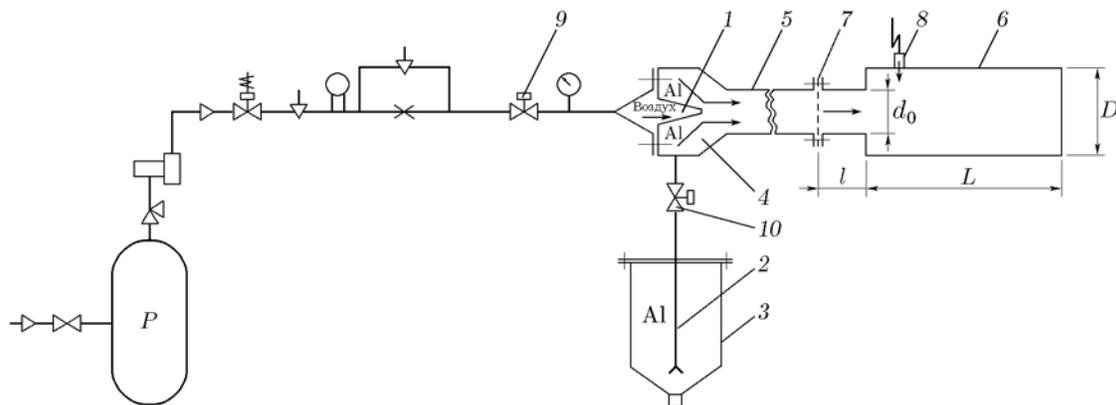


Рис. 5. Схема экспериментальной установки:

1 — сопло эжектора, 2 — трубка заборки порошка, 3 — бункер, 4 — приемная камера эжектора, 5 — камера смешения эжектора, 6 — камера сгорания, 7 — перфорированный диск, 8 — свеча зажигания, 9, 10 — краны с электроприводом

ния была разработана специальная система, которая состояла из источника питания, силоизмерительного датчика, электросекундомера, устройства печати и преобразователя. Данная система позволяла измерять расход порошка алюминия с погрешностью $\approx 3 \div 5 \%$.

Измерение температуры продуктов сгорания аэровзвеси частиц алюминия в камере проводилось с помощью вольфрам-рениевых термопар ИС-629 с рабочим диапазоном $300 \div 2500 \text{ }^\circ\text{C}$.

Уровень и масштаб турбулентности потока аэровзвеси на входе в камеру сгорания изменялись с помощью решеток. Решетки представляли собой перфорированные диски, которые устанавливались в камере смешения на различных расстояниях l от плоскости внезапного расширения и позволяли увеличить уровень начальной турбулентности до $\varepsilon_0 = 22 \%$.

Скорость и турбулентные характеристики «чистого» (без частиц алюминия) воздушного потока измеряли с помощью комплекта термоанемометрической аппаратуры DISA-55M. Поскольку измерить турбулентность потока аэровзвеси не представлялось возможным из-за отсутствия необходимой аппаратуры, далее в тексте значения начального уровня турбулентности приводятся для «чистого» воздушного потока.

Границы устойчивого горения определяли в серии испытаний с достижением срыва пламени. Эксперименты проводили по следующей методике. При произвольном расходе воздуха и горючего запускалась камера сгорания, затем отключалась свеча зажигания и уменьшался

расход алюминия до наступления срыва. После того как расходы горючего 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. Затем эти циклы повторялись при других расходах и скоростях воздуха до тех пор, пока не определялся весь диапазон устойчивого горения.

В данных испытаниях коэффициент избытка воздуха α рассчитывали по отношению измеренных расходов горючего и окислителя. Скорость потока аэровзвеси $u_{\text{ср}}$ на входе, при которой происходит срыв пламени, определяли как среднеобъемную скорость воздуха в поперечном сечении камеры смешения эжектора (с учетом измеренной температуры воздуха в плоскости внезапного расширения).

Экспериментальные данные по определению границ устойчивого горения были обработаны в виде зависимости $u_{\text{ср}}(\alpha)$. Каждой точке соответствуют, как минимум, пять измерений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Известно [4], что если горение частиц металлов происходит в кинетическом режиме, то скорость горения существенно зависит от температуры горения. Это дает основание предположить, что зависимости скорости горения от коэффициента избытка окислителя, начальной температуры, давления и т. д. будут качественно подобны соответствующим зависимостям для газов [11]. Тогда для аэровзвеси ча-

стиц алюминия зависимость скорости пламени от коэффициента избытка окислителя, как и для газового пламени, должна иметь максимум вблизи стехиометрии.

Если же горение частиц контролируется диффузией окислителя к поверхности частицы или к зоне парофазного горения, то скорость горения определяется скоростью подвода окислителя. В этом случае максимальная скорость пламени частиц, горящих в диффузионном режиме, достигается при концентрациях горючего, которые в несколько раз могут превышать стехиометрическую концентрацию [4]. Например, частицы алюминия среднего диаметра $d_{32} = 9$ мкм в воздухе при атмосферном давлении горят в диффузионном режиме, и скорость пламени монотонно увеличивается с ростом концентрации горючего [5].

Поскольку важным критерием режима горения аэрозвесей частиц металлов является зависимость скорости пламени от начальной температуры воздуха, необходимо определить влияние начальной температуры воздуха T_0 на скорость срыва пламени $u_{ср}$ и пределы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия. Такое влияние иллюстрирует рис. 6.

Известно [4], что для частиц алюминия, реагирующих в кинетическом режиме, значения скорости пламени хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью $u_f \approx T_0^2$. На рис. 6 видно, что зависимость $u_{ср}(T_0)$ отличается от квадратичной, это можно объяснить тем, что в газозвесах в интервале температуры $250 \div 600$ К зависимость $u_f(T_0)$ значительно слабее [12].

Представленные на рис. 6 результаты также можно объяснить тем, что промышленный порошок АСД-1 полидисперсный, поэтому происходит смена режима горения частиц алюминия с контролируемого диффузией на кинетический, т. е. реализуется переходный режим горения.

Результаты экспериментов с подогревом воздуха показали смещение диапазона устойчивого горения в область бедных смесей и расширение границы «бедного» срыва, что объясняется увеличением скорости турбулентного горения, обусловленного ростом нормальной скорости горения. Как показано в [12], с увеличением начальной температуры потока от 293 до 573 К нормальная скорость горения возрастает с 0.08 до 0.3 м/с.

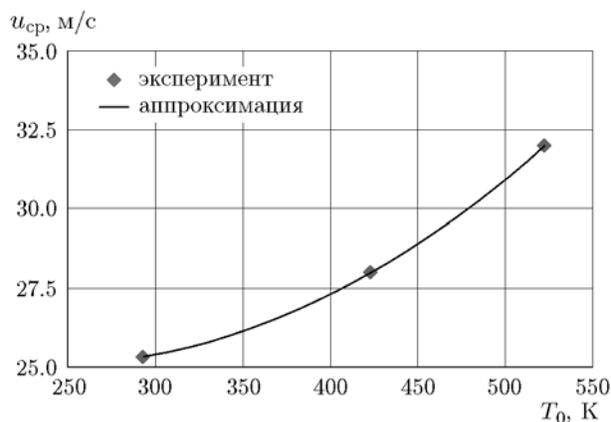


Рис. 6. Влияние начальной температуры воздуха на скорость срыва пламени (порошок АСД-1, $D = 0.08$ м ($H = 0.04$ м), $\alpha = 0.2$, $p_0 = 0.1$ МПа)

Второй причиной смещения диапазона устойчивого горения в область бедных смесей может быть увеличение скорости прогрева частиц алюминия до температуры воспламенения, что обеспечивает устойчивое горение при больших скоростях аэрозвеси на входе в камеру сгорания. С приближением начальной температуры среды к температуре самовоспламенения частиц (1300 К) теория предсказывает резкое усиление зависимости $u_f(T_0)$ [13].

Было установлено также, что с ростом T_0 устойчивое горение в потоке аэрозвеси, содержащей частицы алюминиево-магниевого сплава ПАМ-4, происходит в более бедных составах.

В [1–3] были определены границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия АСД-4 в узком диапазоне коэффициента избытка воздуха. Максимальные значения скорости потока, при которой происходит срыв пламени, были зафиксированы при $\alpha \approx 0.1 \div 0.2$.

Границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц алюминия АСД-4 в диапазоне $\alpha = 0.5 \div 2.0$, полученные в настоящей работе, представлены на рис. 7. Видно, что в диапазоне $\alpha = 0.5 \div 2.0$ для аэрозвеси, содержащей частицы АСД-4 среднего диаметра $d_{32} = 7.4$ мкм, максимальная скорость потока $u_{ср}$, при которой происходит срыв пламени, соответствует значению $\alpha \approx 1.0$.

Максимальное значение $u_{ср}$ при $\alpha \approx 1.0$ объясняется максимальной скоростью распространения пламени в аэрозвеси частиц алю-

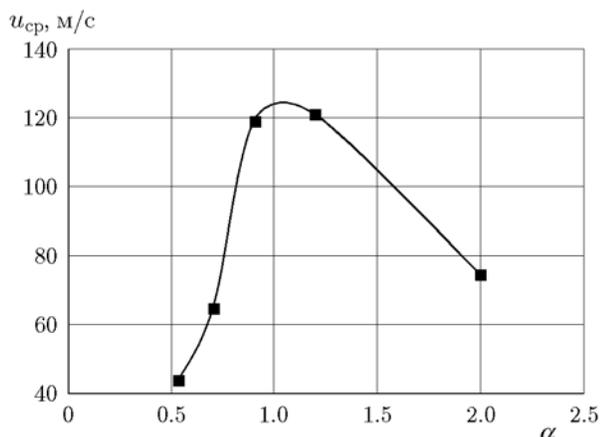


Рис. 7. Границы устойчивого горения в потоке аэрозвеси частиц АСД-4 диаметром $d_{32} = 7.4$ мкм ($D = 0.07$ м ($H = 0.05$ м), $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293$ К)

миния стехиометрического состава. Известно, что, когда горение частиц металла контролируется кинетикой химических реакций, максимум скорости пламени, как и в газах, находится вблизи стехиометрии ($\alpha \approx 1.0$). Такая зависимость экспериментально получена для частиц алюминия и для частиц железа диаметром 5 мкм [4].

Установлено, что границы срыва пламени в потоке аэрозвеси частиц алюминия АСД-4 в диапазоне $\alpha = 0.5 \div 2.0$, по аналогии с однородными горючими смесями [14], можно аппроксимировать отношением скорости потока аэрозвеси к характерному параметру стабилизатора u/H^n . Результаты обработки экспериментальных данных показали, что для аэрозвеси, содержащей порошок марки АСД-4, показатель степени в выражении u/H^n соответствует значению $n = 0.05$. При $n = 0.05$ полученное выражение хорошо описывает экспериментальные данные.

Таким образом, экспериментально установлено, что для аэрозвеси частиц алюминия АСД-4 со средним размером $d_{32} = 7.4$ мкм зависимость $u_{cp}(\alpha)$ имеет максимум при $\alpha \approx 1.0$.

Для определения влияния среднего размера частиц алюминия d_{32} на пределы устойчивого горения в камере с внезапным расширением были выбраны порошки алюминия АСД-1 и АСД-4. В экспериментах в камере сгорания диаметром 0.04 м получено, что с уменьшением значений d_{32} с 17.4 до 7.4 мкм границы устойчивого горения расширяются и увеличивается скорость срыва пламени u_{cp} .

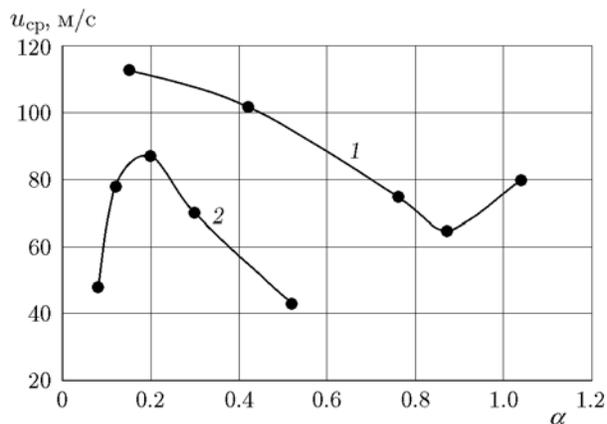


Рис. 8. Влияние фракционного состава аэрозвеси на границы устойчивого горения:

$D = 0.08$ м ($H = 0.04$ м), $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293$ К; фракционный состав аэрозвеси: 1 — 5 мкм — 30 %, 25 мкм — 35 %, 75 мкм — 35 %; 2 — 5 мкм — 15 %, 25 мкм — 40 %, 75 мкм — 45 %

Аналогичные результаты для тех же самых марок порошков алюминия получены в испытаниях в камере сгорания диаметром 0.07 м. Как и в камере сгорания диаметром 0.04 м, с уменьшением d_{32} границы устойчивого горения расширяются и скорость потока, при которой наступает срыв пламени, увеличивается.

Характер влияния размера частиц на пределы устойчивого горения не изменился, когда в качестве горючего использовался порошок марки ПА-4 с частицами алюминия в форме пластин.

Известно [2], что фракционный состав аэрозвеси оказывает существенное влияние не только на распределение температуры в волне горения, но и на скорость распространения пламени. Для определения влияния фракционного состава полидисперсной аэрозвеси на пределы устойчивого горения была подготовлена топливная композиция, состоящая из трех фракций со средним размером частиц 5, 25 и 75 мкм. При проведении испытаний в аэрозвеси изменялось содержание каждой фракции.

Влияние фракционного состава полидисперсной аэрозвеси частиц алюминия на границы устойчивого горения иллюстрирует рис. 8. Видно, что с увеличением содержания мелких частиц в аэрозвеси и уменьшением крупных скорость срыва пламени увеличивается и расширяется область устойчивого горения. Это можно объяснить, во-первых, увеличением содержания мелкой фракции частиц, которые

быстрее воспламеняются и сгорают, что приводит к увеличению теплового потока во фронте пламени и уменьшению толщины последнего. Во-вторых, в аэровзвеси данного фракционно-го состава кондуктивный теплоперенос, вероятно, оказывает более существенное влияние, чем радиационный, поскольку при преимущественно радиационной теплопередаче увеличение концентрации мелких частиц снижает скорость распространения пламени [15].

С позиций теории стабилизации пламени, основанной на соотношении характерных времен, влияние начальной турбулентности ε_0 на устойчивость горения порошкообразного алюминия, с одной стороны, характеризуется уменьшением размера зоны рециркуляции с ростом пульсаций скорости, а следовательно, уменьшением времени контакта. С другой стороны, турбулентность интенсифицирует тепло- и массообменные процессы между основным потоком аэровзвеси и зоной рециркуляции, воздействуя тем самым на локальное соотношение компонентов в зоне, от которого, в свою очередь, зависят как температура горения, так и скорость распространения пламени [3].

Влияние начальной турбулентности на границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц АСД-1 в камере сгорания диаметром 0.05 м представлены на рис. 9. Видно, что при установке решетки (с увеличением начального уровня турбулентности ε_0) область устойчивого горения в камере сгорания диаметром 0.05 м расширяется и увеличивается скорость потока, при которой происходит срыв пламени. Объяснить это можно увеличением времени пребывания частиц алюминия в зоне рециркуляции и времени контакта частиц алюминия с высокотемпературными продуктами горения зоны рециркуляции, а также ростом температуры в ней [3].

Были определены также границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц АСД-4 и АСД-1 в испытаниях в камере сгорания диаметром 0.07 м без решетки во входном канале и при ее установке на расстоянии $l = 0.02$ м. Установлено, что для аэровзвеси, содержащей частицы АСД-1, границы устойчивого горения сужаются как по составу смеси, так и по скорости потока, а для взвеси с частицами АСД-4 — расширяются.

Данный факт можно объяснить тем, что решетка оказывает неоднозначное влияние на локальные значения температуры в зоне ре-

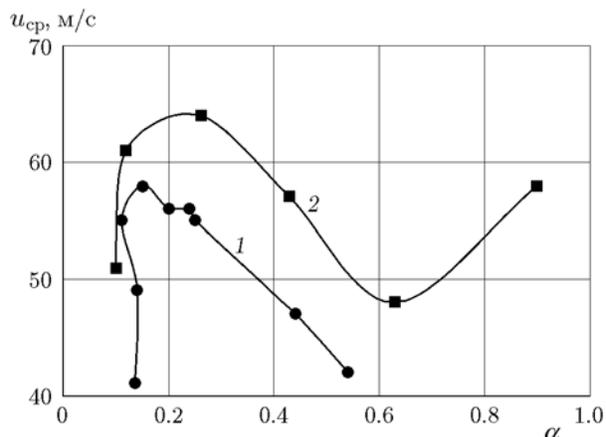


Рис. 9. Влияние начальной турбулентности ε_0 на границы устойчивого горения:

порошок АСД-1; $D = 0.05$ м ($H = 0.03$ м), $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293$ К; 1 — без решетки ($\varepsilon_0 = 5\%$), 2 — с решеткой $l = 0.02$ м ($\varepsilon_0 = 22\%$)

циркуляции. В зависимости от диаметра частиц алюминия она может как увеличиваться, так и уменьшаться. Это обусловлено тем, что при горении распыленного порошкообразного металлического горючего в газообразном потоке окислителя основную роль играют гетерогенные реакции на поверхности частиц. Для порошка АСД-4 с размером частиц $d_{32} = 17.4$ мкм эти реакции определяются непосредственно скоростью химических реакций и рост турбулентности ведет только к уменьшению времени пребывания частиц в зоне рециркуляции, к увеличению локального значения α и, соответственно, к снижению температуры в зоне рециркуляции. Для порошка АСД-1 со средним размером частиц $d_{32} = 17.4$ мкм наличие решетки во входном канале ведет к уменьшению скорости потока аэровзвеси u_0 , следовательно, к увеличению времени пребывания части алюминия в зоне рециркуляции, а также к росту относительных скоростей частиц алюминия и воздуха. А поскольку гетерогенные реакции определяются массопереносом кислорода воздуха к реагирующей поверхности частицы, интенсивность которого увеличивается с ростом их относительных скоростей, все это в конечном итоге обуславливает рост температуры в зоне рециркуляции [3].

В процессе испытаний по определению границ устойчивого горения были выполнены измерения температуры продуктов сгорания в зоне рециркуляции T_{rec} .

Результаты, полученные в камере сгора-

ния диаметром 0.08 м, показали, что в канале с решеткой (с уменьшением ε_0) средняя температура в зоне рециркуляции по сравнению с гладким каналом увеличивается с 1700 до 1970 К для АСД-4 и уменьшается с 2030 до 1890 К для АСД-1.

Была установлена также зависимость $T_{rec}(\alpha)$ для аэровзвеси частиц алюминиево-магниевого сплава ПАМ-4 как в случае устойчивых режимов горения, так и близких к срыву пламени.

На рис. 10 представлена зависимость температуры продуктов сгорания сплава ПАМ-4 в зоне рециркуляции при устойчивом режиме горения. На данном рисунке также показана зависимость термодинамической температуры продуктов сгорания алюминия от коэффициента избытка воздуха, полученная расчетным путем [2]. Из рис. 10 видно, что обе кривые, существенно различаясь по уровню температур, качественно совпадают. Кроме того, на зависимости температуры продуктов сгорания ПАМ-4 в зоне рециркуляции от коэффициента избытка воздуха имеется два максимума: первый при $\alpha \approx 0.2$, второй при $\alpha \approx 1.0$. Расчетная зависимость температуры продуктов сгорания для алюминия $T(\alpha)$ также имеет два максимума при тех же значениях α .

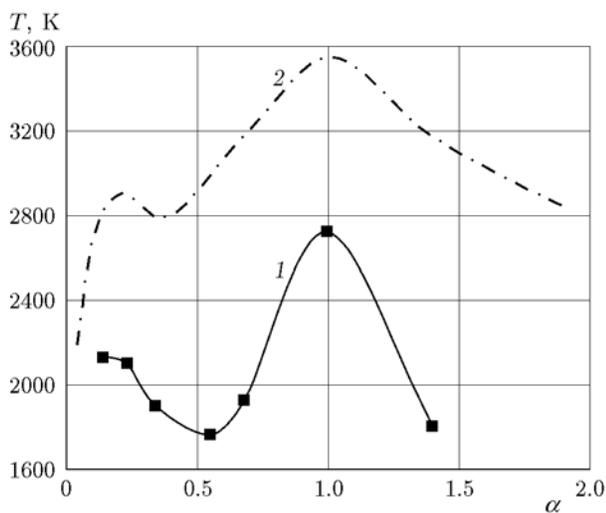


Рис. 10. Влияние коэффициента избытка воздуха на температуру продуктов сгорания:

$D = 0.08$ м ($H = 0.04$ м), $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293$ К; 1 — температура продуктов сгорания ПАМ-4 в зоне рециркуляции: точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация; 2 — расчетная термодинамическая температура продуктов сгорания алюминия [2]

На основе полученных экспериментальных данных был построен обобщающий график зависимости $u_{ср}(\alpha)$, который представлен на рис. 11. Видно, что, в отличие от данных [1–3], зависимость $u_{ср}(\alpha)$ имеет два максимума: один в области богатых смесей, второй — стехиометрических. Здесь так же, как и в [1–3], при $\alpha \approx 0.1 \div 0.2$ наблюдается резкий рост скорости срыва пламени в потоке аэровзвеси частиц алюминия, которая достигает максимума при $\alpha \approx 0.2$. Резкое увеличение скорости срыва при данных значениях α происходит за счет дополнительного тепловыделения и роста температуры, обусловленных реакцией азотирования [1, 8]. При дальнейшем увеличении α растет содержание кислорода в зоне реакции. Молекулы кислорода замещают молекулы азота, однако ввиду низкого содержания кислорода в зоне реакции в диапазоне $\alpha \approx 0.2 \div 0.6$ скорость срыва пламени уменьшается. Затем, при насыщении зоны реакции кислородом, его становится достаточно для полного сгорания частиц алюминия, вследствие чего скорость срыва пламени возрастает. Второй максимум скорости срыва соответствует значению $\alpha \approx 1.0$.

При дальнейшем обеднении смеси до $\alpha \approx 2.7$ и, соответственно, с понижением температуры скорость срыва уменьшается. Это согласуется с данными [9], где показано, что мак-

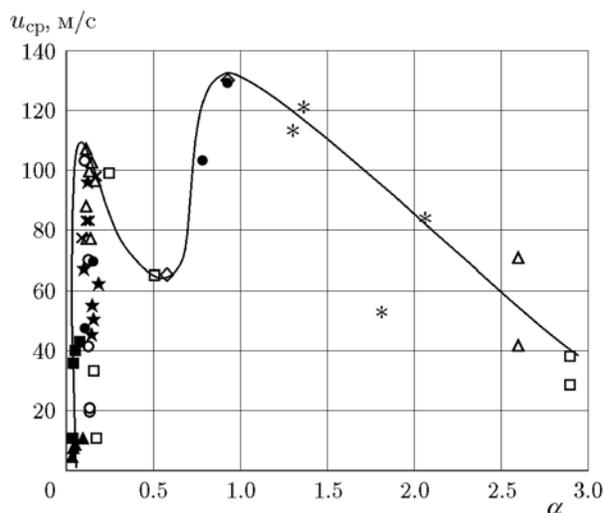


Рис. 11. Границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия:

$D = 0.04 \div 0.08$ м, $\varepsilon_0 = 5 \div 22$ %, $p_0 = 0.1$ МПа, $T_0 = 293 \div 523$ К, $d_{32} = 7.4 \div 17.4$ мкм; ★, △, □, *, ○, ×, ● — данные настоящей работы, ▲ — данные [2], ■ — данные [1]

симальные скорости распространения пламени соответствуют значению $\alpha \approx 1.0$ и с увеличением α в диапазоне $\alpha \approx 1 \div 5$ уменьшаются.

Принимая во внимание то обстоятельство, что скорость набегающего на стабилизатор потока аэрозвеси в момент срыва фронта пламени равна скорости распространения пламени, по имеющейся зависимости $u_{\text{ср}}(\alpha)$ можно построить зависимость $u_f(\alpha)$.

На рис. 12 представлена зависимость $u_f(\alpha)$, а также зависимость температуры продуктов сгорания алюминия T от коэффициента избытка воздуха, полученная в результате термодинамических расчетов в [2]. Видно, что максимальные расчетные значения термодинамической температуры продуктов сгорания алюминия и экспериментальные значения скорости распространения пламени соответствуют значениям $\alpha \approx 0.2$ и 1.0.

Таким образом, установленная зависимость $u_f(\alpha)$ согласуется с результатами термодинамического анализа горения аэрозвесей частиц алюминия в воздухе и соответствует теоретическим представлениям, согласно которым при $\alpha \approx 0.2$ и 1.0 в аэрозвесах частиц алюминия тепловыделение, температура и нормальная скорость пламени принимают максимальные значения [1, 4].

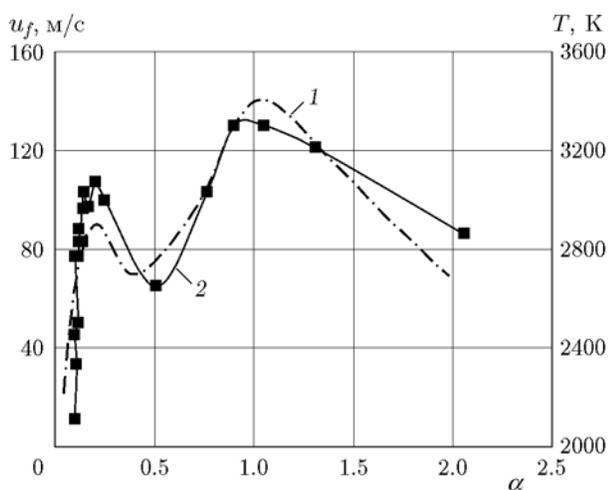


Рис. 12. Зависимость термодинамической температуры и скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха:

1 — термодинамическая температура продуктов сгорания алюминия, расчет [2], 2 — скорость распространения пламени, точки — эксперимент, сплошная линия — аппроксимация

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные границы устойчивого горения в турбулентном потоке аэрозвеси частиц алюминия адекватно отражают зависимость скорости распространения пламени от коэффициента избытка воздуха и соответствуют теоретическим представлениям.

В случае, когда горение частиц алюминия контролируется кинетикой химических реакций, максимум скорости срыва пламени (соответственно, и скорости распространения пламени) находится вблизи стехиометрии $\alpha_1 \approx 1.0$.

Для частиц, горящих в диффузионном режиме, максимальные значения скорости срыва пламени (следовательно, и скорости распространения пламени) соответствуют значениям $\alpha_2 \approx 0.2$.

В области $\alpha_2 < \alpha < \alpha_1$ скорость срыва пламени, соответственно, и скорость его распространения убывают при кинетическом режиме горения и возрастают при диффузионном.

Установлено влияние начальной температуры воздуха, турбулентности, фракционного состава и размера частиц на границы устойчивого горения в турбулентном потоке аэрозвеси частиц алюминия.

На основе результатов, полученных в настоящей работе, можно сделать следующие выводы.

Скорость срыва пламени увеличивается и пределы распространения пламени расширяются с повышением начальной температуры воздуха и уменьшением размера частиц алюминия.

С увеличением начальной турбулентности для аэрозвеси частиц алюминия АСД-4 диаметром $d_{32} = 7.4$ мкм скорость срыва пламени уменьшается и сужаются пределы его распространения. В случае частиц алюминия АСД-1 диаметром $d_{32} = 17.4$ мкм скорость срыва пламени увеличивается и пределы его распространения расширяются.

В полидисперсной аэрозвеси с ростом содержания мелких частиц и уменьшением крупных скорость срыва пламени увеличивается и расширяется область устойчивого горения.

Выявлена характерная особенность зависимости скорости срыва пламени от коэффициента избытка воздуха, состоящая в наличии двух максимальных значений — при $\alpha \approx 0.2$ и $\alpha \approx 1.0$.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что на скорость срыва пламени, соответственно, и на скорость его распространения в большей степени оказывает влияние состав аэровзвеси, а не гидродинамические параметры потока.

Установленные границы устойчивого горения в потоке аэровзвеси частиц алюминия в диапазоне коэффициента избытка воздуха $\alpha = 0.1 \div 2.0$ позволили выявить характер зависимости $u_f(\alpha)$ и показать, что она соответствует теоретическим представлениям, согласно которым при $\alpha \approx 0.2$ и 1.0 в аэровзвесах частиц алюминия тепловыделение, температура и скорость распространения пламени максимальны.

Результаты исследований, полученные в настоящей работе, можно использовать при создании расчетных моделей для описания процессов горения аэровзвеси частиц алюминия в турбулентном потоке воздуха, а также в дальнейшем они позволят правильно интерпретировать экспериментальные данные.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Малинин В. И.** Внутрикамерные процессы в установках на порошкообразных металлических горючих. — Пермь: УрО РАН, 2006.
2. **Ягодников Д. А.** Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
3. **Егоров А. Г.** Процессы горения порошкообразного алюминия в прямоточных камерах сгорания реактивных двигательных установок. — Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2004.
4. **Полетаев Н. И.** Связь скорости распространения пылевого пламени с режимом горения частиц горючего // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 6. — С. 60–69.
5. **Алексеев А. Г., Судакова И. В.** Скорость распространения пламени в аэровзвесах металлических порошков // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 34–36.
6. **Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцовый А. В.** Распространение фронта химической реакции в двухфазном потоке // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика. Вып. 4. — Харьков: ХАИ, 1986. — С. 66–69.
7. **Кумагаи.** Горение: пер. с япон. — М.: Химия, 1979.
8. **Ягодников Д. А., Сухов А. В., Малинин В. И., Кирьянов И. М.** Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. — 1990. — № 1. — С. 121–124.
9. **Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцовый А. В., Шпара А. П.** Горение газовзвесей металлических порошков // Физика горения и взрыва. — 1981. — Т. 17, № 6. — С. 49–54.
10. **Щетинин Г. А.** Численное моделирование горения аэровзвеси частиц алюминия с использованием функции плотности распределения вероятности // Политехн. молодеж. журн. — 2017. — № 11. — С. 1–13.
11. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
12. **Агеев Н. Д., Горошин С. В., Золотко А. Н., Полетаев Н. И., Шошин Ю. Л.** Скорость стационарного пламени в газовзвесах алюминия // Горение гетерогенных и газовых систем: материалы IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. — Черногоровка, 1989. — С. 83–85.
13. **Руманов Э. Н., Хайкин Б. И.** О распространении пламени по взвеси // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 201, № 1. — С. 144–147.
14. **Хитрин Л. Н.** Физика горения и взрыва. — М.: Изд-во МГУ, 1957.
15. **Ярин Л. П., Сухов Г. С.** Основы теории горения двухфазных сред. — Л.: Энергоатомиздат, 1987.

Поступила в редакцию 02.10.2018.

После доработки 11.01.2019.

Принята к публикации 20.02.2019.