

УДК 536.46

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ ПО АЭРОВЗВЕСИ
АЛЮМИНИЯ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ***Д. А. Ягодников, А. В. Воронцовский, В. И. Лапицкий**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана,
107005 Москва*

Проведены измерения скорости распространения пламени по аэровзвеси порошкообразного алюминия марки АСД-1 в диапазоне давлений 0,1–0,05 МПа и при различных соотношениях компонентов, соответствующих избытку горючего. Установлено линейное уменьшение скорости пламени при снижении давления. Показано, что наиболее чувствительным к изменению давления является процесс горения алюминиево-воздушной смеси. С помощью спектральной кинесъемки и оптико-электронной дешифровки изображений получены поля температур во фронте пламени переобогащенной аэровзвеси и зарегистрировано образование вихревых структур, обусловленных гидродинамическим взаимодействием процессов оседания частиц, формирования и распространения поверхности горения.

В процессе эксплуатации различных энергетических установок воспламенение и горение газодисперсных систем может происходить при давлении окружающей окислительной среды p_0 , отличном от атмосферного. Поэтому для оптимизации параметров рабочего процесса проводятся экспериментальные исследования по определению влияния давления на особенности воспламенения и горения как одиночных частиц металлов, так и газозвесей. Причем, если для одиночных частиц времена задержки воспламенения и горения, температура воспламенения и некоторые другие параметры при пониженных и повышенных давлениях определены [1–3], то экспериментальные исследования газозвесей (в основном аэровзвесей) выполнены при давлении, равном или большем атмосферного (например, [4–6]). Поэтому цель данной работы — исследование характеристик воспламенения и горения аэровзвеси частиц порошкообразного алюминия марки АСД-1 (среднемассовый диаметр 25 мкм) при пониженных давлениях. В качестве базовой количественной характеристики изучаемых процессов используется значение скорости распространения пламени W_f по аэровзвеси частиц.

Экспериментальные исследования проводились на расположенном вертикально рабочем участке, сечением 80 × 80 мм с прозрачной передней стенкой из полиметилметакрилата. Высота участка составляет 1500 мм, что позволяет детально исследовать динамику процессов формирования, трансформации и распространения пламени. В боковых стенках размещались окна с установленными в них фотоспротивлениями, предназначенными для регистрации воспламенения аэровзвеси. Необходимое разрежение в рабочем участке создается вакуумным насосом ВН-461М. Для измерения давления и температуры пламени используются датчик давления МДД200-1000 и вольфрам-рениевые термопары типа ВР5/20, спаи которых (диаметр 0,5 мм) расположены на расстоянии 10 мм от стенки. Поскольку диаметр защитной керамической оболочки термопары составляет 2 мм, влиянием зонда на гидродинамику пламени можно пренебречь. Показания преобразователей регистрируются на шлейфовом осциллографе Н-117.

Подробно методика определения скорости распространения пламени изложена в [7]. Здесь считаем необходимым остановиться только на сле-

дующем. Пламя распространяется вверх от открытого конца к закрытому, а продукты сгорания отводятся в ресивер, объем которого на порядок больше объема рабочего участка. В этом случае имеет место ламинарный режим распространения пламени, скорость которого вычисляется суммированием скоростей оседания аэрозвеси и распространения пламени относительно стенок рабочего участка. Увеличение давления в ходе эксперимента не превышает 15% (~12% приходится на стадию первоначального воспламенения и ~3% на стадию горения Al). Поэтому подчеркнем, что при представлении и анализе полученных результатов используется начальное значение давления.

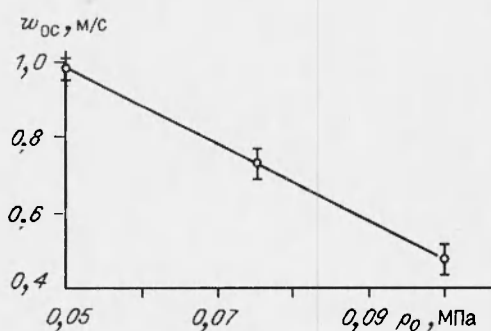


Рис. 1. Зависимость скорости оседания от давления.

ние между частицами на два порядка превышает их размер, и, следовательно, индивидуальное взаимодействие между ними незначительно, для объяснения полученного результата можно воспользоваться законом сопротивления Стокса

$$F = 6\pi\nu\rho_0 r_s v_s. \quad (1)$$

Здесь r_s , v_s — радиус и скорость отдельной частицы, ν , ρ_0 — коэффициент кинематической вязкости и плотность воздуха. Из (1) следует, что уменьшение ρ_0 приводит при прочих равных условиях к снижению силы сопротивления F , действующей на частицы. Анализ серии экспериментов показывает, что значение скорости оседания не зависит от концентрации Al (в пределах погрешности измерений и принятой доверительной вероятности 0,95 для построения изображенного на рис. 1 доверительного интервала $W_{ос}$).

Визуализация и спектральный анализ. Использование прозрачной передней стенки позволило осуществить киносъемку распространения пламени (кинокамера «Красногорск-3», 32 кадра · с⁻¹). Полученные кинограммы анализировались оптико-электронным методом [7], позволяющим

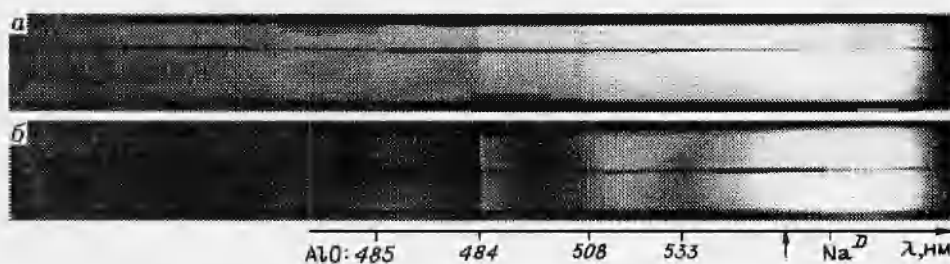


Рис. 2. Спектрограммы продуктов сгорания алюминиево-воздушной смеси.

а — $\rho_0 = 0,075$ МПа, $\alpha = 0,12$; б — $\rho_0 = 0,05$ МПа, $\alpha = 0,11$.

преобразовывать по степени почернения фотоэмульсии черно-белые полутоновые изображения в кодовый эквивалент и идентифицировать его с величиной регистрируемого параметра, например, температуры.

Для достижения оптимальных параметров кинопирометрического метода определения температуры проведена съемка полного спектра излучения продуктов сгорания аэровзвеси алюминия на призменном спектрографе ИСП-51 (время экспозиции $\sim 1,5$ с). Из спектрограмм (рис. 2) видно, что в видимом диапазоне длин волн на фоне сплошного спектра, источником которого являются субдисперсные частицы оксида алюминия, выделяются неразрешенный дублет натрия (589 нм) и колебательные полосы AlO (переход $B^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$) с передними кантами 465, 484, 508, 533 нм. В связи с этим, для получения температурных характеристик процесса горения аэровзвеси используется метод регистрации монохроматической яркости излучения к-фазы. С этой целью на объектив кинокамеры устанавливался интерференционный светофильтр. Поэтому в данном случае речь идет о яркостной пирометрии с переходом к истинной температуре по известной формуле Вина [8, 9]. Рабочая длина волны киносъемки, соответствующая максимуму пропускания интерференционного светофильтра ($\lambda_c = 550$ нм обозначена стрелкой на рис. 2), выбрана на участке спектра, где отсутствуют молекулярные полосы, т. е. фиксируется излучение непосредственно к-фазы.

Визуализация процесса распространения пламени позволила установить, что после воспламенения аэровзвеси, осуществляемого электрической дугой, поверхность пламени сильно натянута. Однако по мере дальнейшего продвижения пламени вверх происходит постепенное уменьшение площади его поверхности и скорости. Начиная с расстояния $l_n = 250 \div 350$ мм от места воспламенения, наблюдается переход к равномерному режиму (рис. 3). Полученный результат подтверждается также расчетами процесса распространения нестационарного пламени [10] и согласуется с экспериментальными исследованиями горения аэровзвесей частиц полистирола, угля и сланца [11], согласно которым на начальном участке пламя ускоряется, а затем, достигнув максимального значения W_f , начинает постепенно замедляться и с определенного момента W_f практически не изменяется. Наличие переходного режима может быть объяснено влиянием на начальный этап формирования пламени системы зажигания, выделяющей значительную мощность ($\sim 1,5$ кВт), что приводит к интенсификации процессов нагрева и воспламенения частиц Al . Проведенные в работах [10, 11] на основе радиационной модели пламени теоретические оценки показывают, что за характерный масштаб реализации установившегося движения ламинарного пламени может быть принята длина пробега излучения продуктов сгорания

$$l_n = 1,5 \tau_s \rho_s / B_k, \quad B_k = \rho_0 / (K_m \alpha), \quad (2)$$

где ρ_s — плотность частицы, K_m — массовое стехиометрическое соотношение, α — коэффициент избытка окислителя в рабочем участке.

С другой стороны, монотонному увеличению скорости препятствует то, что режим оседания аэровзвеси близок к ламинарному. Так, в условиях эксперимента число Рейнольдса, рассчитанное по скорости оседания

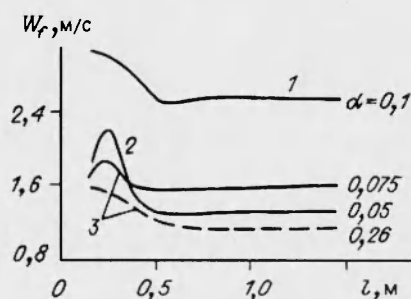


Рис. 3. Изменение скорости горения по длине рабочего участка.
 p_0 , МПа: 1 — 0,1, 2 — 0,075, 3 — 0,05.

и эквивалентному диаметру трубы, составляет 2600 ($p_0 = 0,1$ МПа) и 2900 ($p_0 = 0,05$ МПа). Кроме того, для реализации высокоскоростного режима распространения пламени нужно, чтобы генерируемая стенками турбулентность достигла ядра потока, что может произойти на расстоянии ~ 25 калибров трубы [12] (в данном случае необходимо $\sim 2,2$ м). Поэтому длины рабочего участка не хватает для смыкания турбулентных пограничных слоев.

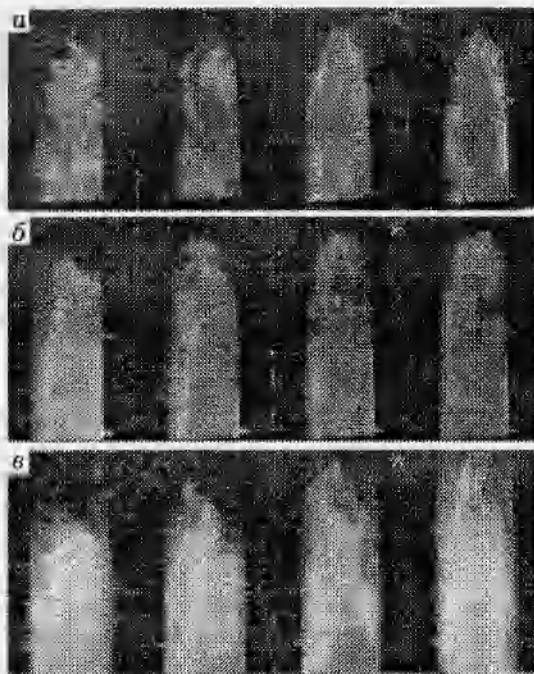


Рис. 4. Кинограммы распространения пламени.
 а — $p_0 = 0,075$ МПа, $\alpha = 0,26$; б — $p_0 = 0,075$ МПа,
 $\alpha = 0,13$; в — $p_0 = 0,05$ МПа, $\alpha = 0,1$. $\Delta\tau = 31$ мс.

влнено спутное движение воздуха, возникновение «конвективной ячейки» и автотурбулизация аэрозвеси. В связи с этим определить в переобогащенной аэрозвеси одну из фундаментальных характеристик горения — нормальную скорость пламени — с удовлетворительной точностью затруднительно, если вообще возможно.

Результаты оптико-электронной обработки кинограмм, отмеченных звездочкой на рис. 4, а–в соответственно, представлены на рис. 5 в виде изотерм. Для анализа за поверхность фронта можно принять область пламени, ограниченную передней изотермой 1930 К, что соответствует фотометрической чувствительности спектрзональной кино съемки и наибольшему градиенту температур. Характерная особенность структуры пламени — наличие области температур, превышающих на 150–200 К равновесное значение ($\alpha = 0,26$, $p_0 = 0,075$ МПа, $T^* = 2500$ К). В следе за фронтом пламени температура уменьшается до ~ 2400 К. Это объясняется, по всей видимости, тем, что в работе используется полидисперсный Al и мелкие частицы алюминия, воспламенившись раньше остальных, горят при местном соотношении компонентов, характеризуемом большим значением α . Вихреобразование также приводит к возникновению зон с отличным от среднего соотношением компонентов. Кроме того, изучение субдисперсных частиц оксида алюминия определяется температурой их образования, которая, согласно результатам работы [14], составляет ~ 3900 К

На рис. 4 представлены кинограммы распространения пламени на установившемся режиме. Видно, что поверхность имеет куполообразную форму сложной структуры и незначительно изменяется в процессе движения. Наблюдаемые возмущения обусловлены, по-видимому, тем, что в процессе оседания аэрозвеси с достаточно большим содержанием дисперсной фазы возникает встречное перемещение микрообъемов газа и образуются вихревые структуры. В результате этого передняя граница оседающей аэрозвеси оказывает локальное турбулизирующее воздействие на пламя. Зарегистрированные гидродинамические особенности распространения пламени удовлетворительно согласуются с данными работы [13], в которой визуализацией процесса оседания при помощи дыма устано-

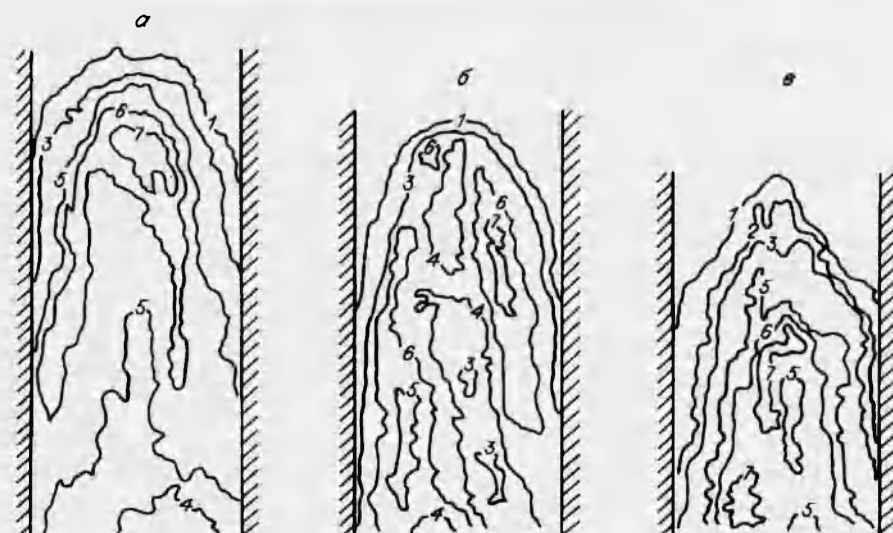


Рис. 5. Изотермы в рабочем участке.

T, K : 1 — 1930, 2 — 2120, 3 — 2290, 4 — 2440, 5 — 2580, 6 — 2650, 7 — 2720.

(химическая конденсация Al_2O_3).

В работе также проводилось зондирование пламени двумя термопарами, расположенными на расстоянии 500 мм друг от друга. Поскольку характерное время распространения пламени составляет ~ 1 с, то из-за инерционности термопар определение температуры данным методом связано со значительными погрешностями. Например, наибольшее значение температуры ~ 1220 К ($\alpha = 0,26$, $p_0 = 0,075$ МПа) зарегистрировано спустя ~ 3 с после прохождения пламенем места установки нижней термопары. Причем показания термопары, размещенной ближе к верхнему концу рабочего участка, на ~ 300 К ниже, так как время ее контакта с продуктами сгорания меньше. Существенное отличие результатов радиационной и зондовой пирометрии объясняется также тем, что при горении порошкообразного Al сказывается осаждение на спай, а термопары расположены вблизи стенки установки, где оказывает влияние пограничный слой. Таким образом, с помощью термопарного зондирования быстропротекающих процессов воспламенения и горения аэродисперсных систем регистрируются заниженные значения температур.

Влияние соотношения компонентов. С увеличением концентрации алюминия (уменьшением коэффициента избытка окислителя) скорость распространения пламени возрастает (рис. 6). Это происходит вследствие увеличения объемной концентрации частиц и объемного тепловыделения, что приводит к увеличению кондуктивных и радиационных тепловых потоков, идущих на нагрев исходной аэрозвеси. Кроме того, с уменьшением α снижается температура воспламенения аэрозвеси [15] и в переобогащенной аэрозвеси при выгорании кислорода протекает экзотермическая реакция азотирования. В результате температура горения аэрозвеси увеличивается, в продуктах сгорания появляется конденсированный нитрид алюминия и границы верхнего концентрационного предела распространения пламени расширяются [16].

Визуализация при помощи кино съемки позволила выявить дополнительный фактор, обуславливающий увеличение W_f . Как видно из представленных на рис. 4, б кинограмм, с уменьшением α увеличивается искривление фронта пламени, что приводит к увеличению поверхности и, следовательно, скорости горения. Однако сделать однозначное заключение о том,

влияние какого из факторов является преобладающим, достаточно трудно вследствие тесной взаимосвязи между отдельными стадиями процесса и особенностями проведения эксперимента в переобогащенной аэровзвеси.

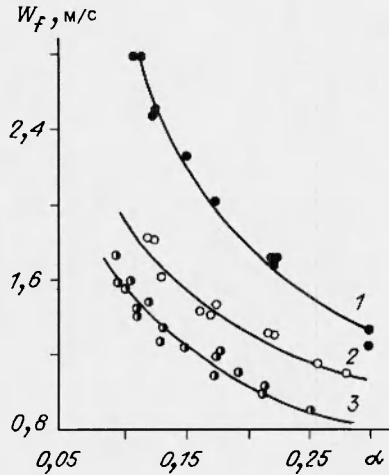


Рис. 6. Зависимость скорости горения от соотношения компонентов. p_0 , МПа: 1 — 0,1, 2 — 0,075, 3 — 0,05.

Отметим также, что смещение зависимости $W_f(\alpha)$ в сторону переобогащенной аэровзвеси согласуется с результатами экспериментально-теоретических исследований, выполненных применительно к аэровзвесям различного дисперсного и химического состава [4, 5, 12, 13, 17].

Влияние давления. При понижении давления в рабочем участке основные закономерности распространения пламени сохраняются. Форма пламени остается куполообразной и на поверхности также видны возмущения, характерный размер которых практически не изменяется

(см. рис. 4,6). Аналогичный результат получен в работе [18] при исследовании влияния давления на параметры турбулентности и турбулентное горение углеводородного топлива: масштаб турбулентности не зависит от давления (в диапазоне $p_0 = 0,06 \div 0,01$ МПа). Дополнительно следует отметить, что в данном случае наличие частиц дисперсной фазы приводит к гашению возникающих пульсаций.

Тем не менее зарегистрированы некоторые отличия, а именно, уменьшение скорости пламени на установившемся режиме. Причем, как видно из рис. 7, зависимость $W_f(p_0)$ в диапазоне $\alpha = 0,11 \div 0,23$ удовлетворительно аппроксимируется (с дисперсией, не превышающей 5,6 %) линейными функциями

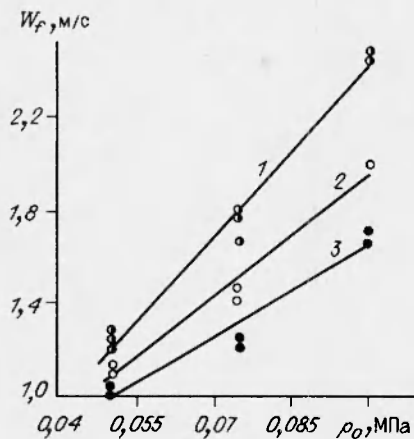


Рис. 7. Зависимость скорости горения от давления. α : 1 — 0,11 \div 0,13, 2 — 0,16 \div 0,18, 3 — 0,22 \div 0,24.

$$\begin{aligned} W_f &= -0,02 + 24,5p_0, & \alpha &= 0,11 \div 0,12, \\ W_f &= 0,22 + 17,3p_0, & \alpha &= 0,16 \div 0,18, \\ W_f &= 0,34 + 13,1p_0, & \alpha &= 0,22 \div 0,23. \end{aligned}$$

Полученные зависимости $W_f(p_0)$ можно объяснить влиянием давления на процессы воспламенения и горения частиц Al. В [19] установлено, что в случае нагрева алюминия в среде кислорода уменьшение давления последнего обуславливает уменьшение (на 5–10 %) скорости низкотемпературного окисления. Кроме того, в соответствии с расчетами характеристик скоростной и температурной неравновесности аэродисперсного фронта пламени по двухконтинуальной модели [5], уменьшение давления от 0,1 до 0,05 МПа приводит к уменьшению критерия Нуссельта с 2,63 до 2,32 (для частицы диаметром 20 мкм) и, следовательно, коэффициента теплопередачи при нагреве частицы. Поэтому можно предполагать, что с понижением давления период задержки несколько увеличивается. Следует отметить, что ингибирующее влияние давления может частично компенсировать снижение температуры частицы алюминия в момент воспламенения, коррелирующее с уменьшением давления паров Al (наиболее существенно при $p_0 \leq 0,05$ МПа), о чем свидетельствуют данные исследований [20, 21].

С другой стороны, при уменьшении давления в исследуемом диапазоне снижается адиабатическая температура горения аэрозвеси на 150–200 К (рис. 8). Это подтверждается уменьшением интенсивности непрерывного спектра излучения к-фазы, на фоне которого более отчетливо различимы молекулярные полосы AlO (см. рис. 1,б). Проведенный химический анализ продуктов сгорания аэрозвеси установил возрастание содержания в к-фазе активного алюминия (см. таблицу), свидетельствующее о снижении полноты сгорания Al. Помимо этого, согласно трехзонной модели горения частиц Al [22], пропорционально уменьшению давления снижается массовая скорость горения, поскольку при этом уменьшается диффузионная проводимость (по отношению к молекулам окислителя) окружающей частицу зоны химической конденсации Al_2O_3 . В результате уменьшаются градиенты тепловых потоков во фронте пламени и интенсивность теплообмена между продуктами сгорания и свежей аэрозвесью. Подтверждением этого является распределение температур (см. рис. 4,в), из которого следует, что зона с наибольшей температурой смещается от вершины фронта в глубину пламени (изотерма 2720 К).

Еще одна особенность распространения пламени при пониженном давлении состоит в увеличении максимального значения видимой скорости пламени и, следовательно, W_f на нестационарном участке, хотя его протяженность почти не изменяется (см. рис. 3). Так, например, при $\alpha = 0,13 \div 0,14$ и $p_0 = 0,1, 0,075, 0,05$ МПа величина $W_f^{max}/W_f = 1,13, 1,18, 1,65$ соответственно. Возрастание W_f^{max} происходит, вероятно, за счет ослабления демпфирующего воздействия среды (уменьшение вязкости воздуха при снижении давления) и замедления про-

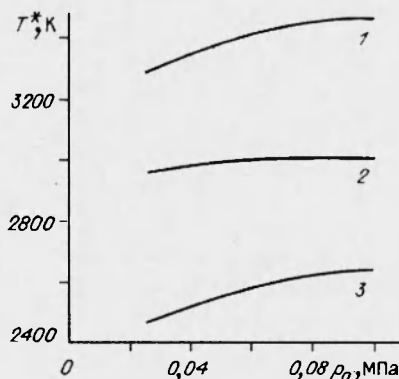


Рис. 8. Зависимость адиабатической температуры горения от давления.
 α : 1 — 0,7, 2 — 0,5, 3 — 0,1.

Относительное массовое содержание активного алюминия в продуктах сгорания

p_0 , МПа	α				
	0,1	0,13	0,17	0,21	0,28
0,05	0,63	0,64	0,61	0,71	—
0,075	—	0,48	0,53	0,47	0,48
0,1	—	0,35	0,29	0,33	0,31

например, при $\alpha = 0,13 \div 0,14$ и $p_0 = 0,1, 0,075, 0,05$ МПа величина $W_f^{max}/W_f = 1,13, 1,18, 1,65$ соответственно. Возрастание W_f^{max} происходит, вероятно, за счет ослабления демпфирующего воздействия среды (уменьшение вязкости воздуха при снижении давления) и замедления про-

цессов скоростной и тепловой релаксации.

Резюмируя полученные в данной работе результаты, отметим следующее. Влияние понижения давления в рабочем участке на отдельные макрокинетические стадии процесса распространения пламени приводит к уменьшению значений W_f . Причем наиболее чувствительным к изменению давления оказывается процесс горения Al. С помощью визуализации изучена структура и определены особенности распространения пламени в переобогащенной аэровзвеси, заключающиеся в гидродинамическом взаимодействии процессов оседания частиц и формирования поверхности горения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирьянов И. М., Малинин В. И., Котельникова Е. И. Расчет влияния давления на воспламенения бора при различных константах окисления // Физика горения и взрыва. 1982. Т. 18, № 5. С. 98–101.
2. Валов Е. А., Гусаченко Е. И., Шевцов В. И. Влияние давления на воспламенение одиночных частиц магния в углекислом газе // Химическая физика процессов горения и взрыва. Горение гетерогенных и конденсированных систем. Черноголовка, 1989. С. 85–87.
3. Флорко А. В., Головкин В. В., Писаренко А. Н. Исследование горения одиночных частиц // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 2. С. 25–40.
4. Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Вяткин А. И. и др. Распространение фронта химической реакции в двухфазном потоке // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика: Темат. сб. науч. тр. / Харьк. авиац. ин-т им. Н. Е. Жуковского, 1987. Вып. 4. С. 66–69.
5. Ягодников Д. А., Воронцов А. В. Влияние скоростей неравновесности на особенности распространения ламинарного пламени в аэродисперсной среде // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 38–44.
6. Яненко Н. Н., Фомин В. М., Федоров А. В. и др. Структура ударных, детонационных волн и комбинированных разрывов в смесях газа и частиц // Механика реагирующих сред и ее приложения. Новосибирск: Наука, 1989. С. 133–143.
7. Ягодников Д. А., Воронцов А. В., Мальцев В. М., Селезнев В. А. О возможности увеличения скорости распространения фронта пламени в аэровзвеси алюминия // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 51–54.
8. Бобров А. Н., Ягодников Д. А., Попов И. В. Воспламенение и горение двухкомпонентной газовой взвеси порошкообразного горючего и окислителя // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 3–7.
9. Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977.
10. Иванищев Л. И., Степанов А. М. Нестационарное распространение пламени по газовой взвеси частиц твердого горючего // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 5. С. 699–705.
11. Тодес О. М., Гольцикер А. Д., Ионушас К. К. Исследование процесса формирования и развития фронта пламени в аэродисперсных системах // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 1. С. 83–88.
12. Андреев М. А., Степанов А. М. Моделирование распространения нестационарного турбулентного пламени по аэровзвеси металлических частиц // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 6. С. 37–46.
13. Горошин С. В., Шевчук В. Г., Бойчук Л. В. и др. Особенности ламинарного пламени аэровзвесей в трубах // Макроскопическая кинетика, химическая и магнитная газодинамика. Томск: ТГУ, 1991. Часть 2. С. 140–141.
14. Parcker W. G., Wolfhard H. G. Emissivity of small particles in flame // Nature. 1948. V. 162, N 4111. P. 259.
15. Афанасьев С. Н., Жарков В. Ю., Озеров Е. С. Воспламенение и горение газовой взвеси частиц алюминия // Физика аэродисперсных систем. Киев, 1985. Вып. 27. С. 39–42.
16. Ягодников Д. А., Сухов А. В., Малинин В. И., Кирьянов И. М. Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным ме-

- талловоздушным смесям // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. 1990. № 1. С. 121–124.
17. **Smoot L. D., Horton H. D.** Flame propagation in the coal dust // Prog. Energy Combust. Sci. 1977. V. 3, N 4. P. 235–239.
 18. **Храмцов В. А.** Исследование влияния давления на параметры турбулентности и на турбулентное горение // Горение при пониженных давлениях и некоторые вопросы стабилизации пламени в однородных и двухфазных системах. М: Изд-во АН СССР, 1960. С. 43–57.
 19. **Gulbransen E. A., Wysong W. S.** Thin oxide films on aluminum // J. Phys. Chem. 1947. V. 51, N 9. P. 1087–1103.
 20. **Kuel D. K.** Ignition and combustion of aluminum and beryllium // AIAA Journal. 1965. V. 3, N 12. P. 2239–2247.
 21. **Бржустовский Т. А., Глассмен И.** Парофазные диффузионные пламена при горении магния и алюминия // Гетерогенное горение / Под ред. А. В. Ильинского. М.: Мир, 1967. С. 126–164.
 22. **Кудрявцев В. М., Сухов А. В., Воронцов А. В., Шпара А. П.** Горение металлов при высоких давлениях (трехфазная модель) // Физика горения и взрыва. 1979. Т. 15, № 6. С. 50–57.

*Поступила в редакцию 20/VI 1994 г.,
в окончательном варианте — 1/III 1995 г.*
