

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ГОРЕНИЕ АЭРОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ

Д. А. Ягодников, А. В. Воронежский

МГТУ им. Н. Э. Баумана, 107005 Москва

На основе экспериментальных исследований обнаружено повышение в 1,2–1,3 раза скорости турбулентного горения аэровзвеси алюминия марки АСД-1 и изменение геометрических характеристик пламени путем воздействия электрического поля напряжением 0,9 кВ, дано объяснение этих эффектов. Положительный результат получен в условиях развитого турбулентного течения и может служить базой для разработки практических рекомендаций по интенсификации и управлению процессами воспламенения и горения как в лабораторных условиях (ламинарный поток), так и в энергетических установках.

Одно из направлений исследования газодисперсных систем заключается в изыскании возможностей интенсификации макрокинетических процессов воспламенения и горения. Данные, опубликованные в работах [1–4], свидетельствуют о снижении периода воспламенения порошкообразного металлического горючего (ПМГ) на основе алюминия при микрокапсулировании частиц ПМГ и введении в состав алюминизированной смесевой топливной композиции активирующих добавок, например оксида кремния. Помимо физико-химических методов (воздействующих, в основном, на покрывающую частицу оксидную пленку) возможен способ интенсификации процессов воспламенения и горения за счет наложения внешнего электрического поля (ВЭП), который детально исследован применительно к гомогенным топливным композициям. Имеющиеся данные [5, 6] позволяют с уверенностью утверждать, что существует взаимосвязь между макрокинетическими процессами воспламенения и горения частиц металлов как с собственными, так и с внешними электромагнитными полями. В частности, в работе [7] показано влияние электрофизики на образование конденсированных продуктов сгорания. Цель данной работы — исследование возможности интенсификации процессов горения и воспламенения аэровзвеси частиц ПМГ на основе алюминия при наложении ВЭП.

Известно, что при горении гомогенных топливных композиций ионы могут образовываться за счет реакций хемоионизации с участием углеводородных радикалов, а в случае «копящих» пламен существенную роль при-

обретает электризация частиц сажи [8]. Для определения ионного состава продуктов сгорания и прогнозирования характера влияния ВЭП при конкретном способе его наложения на зону горения выполнен термодинамический расчет по универсальной программе АСТРА [9]. Представленные в таблице результаты свидетельствуют, что отрицательный заряд несут, в основном, свободные электроны и молекулы AlO , а положительный — атомы Al , механизм возникновения которых исследован в работе [10]. Причем с повышением температуры горения T_r (т. е. при приближении смеси к стехиометрическому составу) возрастает концентрация ионов в продуктах сгорания и расширяется их номенклатура за счет появления $Al_2O_2^-$, O^- , NO^+ .

Заметим, что термодинамические расчеты дают равновесные значения параметров и, кроме того, в них не учтена возможность электризации частиц конденсированного оксида алюминия. Поэтому вначале проведено исследование влияния ВЭП на особенности горения ламинарного диффузионного аэродисперсного пламени. Для этого использовали бунзенскую горелку, конструкция которой аналогична описанной в [11], а в качестве металлического горючего — порошкообразный алюминий марки АСД-1 со среднемассовым диаметром ≈ 22 мкм. ПМГ подавали методом заторможенного плотного слоя [12], что позволяло снизить расход транспортирующего газа (в частности, воздуха) до 3% от массового расхода алюминия.

В экспериментах реализована схема поперечного поля, накладываемого между соплом

Ионный состав продуктов сгорания алюминиево-воздушной смеси при атмосферном давлении

α	T_r , К	p_i , Па					Свободные электроны
		Al^+	NO^+	Al^-	$Al_2O_2^-$	O^-	
0,2	2570	0,41	0	0,21	0	0	0,2
0,5	3024	3,53	0	2,32	0	0	1,21
1	3582	15,2	0,000 26	9,3	0,128	0,045	5,72
2	2855	0,0025	0,000 26	0,0001	0	0	0,0026

Примечание. α — коэффициент избытка окислителя, p_i — парциальное давление компонентов смеси.

горелки с выходным диаметром 15 мм и расположенным соосно цилиндрическим сетчатым электродом диаметром 75 и высотой 200 мм, выполненным из нержавеющей проволоки. Аэродисперсное пламя стабилизировалось путем сжигания пропановоздушной смеси, подаваемой через сопло горелки. При расходах пропана и воздуха 0,099 и 0,138 г/с соответственно температура пилотного пламени ≈ 2200 К, что достаточно для воспламенения частиц алюминия.

Остановимся на результатах экспериментального исследования в отсутствие внешнего поля. Расход ПМГ, измеренный по скорости перемещения поршня, составил 0,2 г/с. Через сопло горелки подается (а потом сжигается) топливная смесь сложного химического состава, в которой горючим являются пропан и алюминий, а окислителем — воздух. Для указанных расходов, приняв, что условная молярная масса горючего $\mu_r = 1000$, его молекулярную формулу можно записать так: $C_{22,5}H_{60}Al_{24,8}$ [13]. Тогда массовое стехиометрическое соотношение, рассчитанное по формуле замещения валентностей [13], равно 7,75, а коэффициент избытка окислителя для данной тройной топливной композиции $\alpha = 0,06$, что свидетельствует о реализации диффузионного аэродисперсного пламени на срезе сопла горелки.

Из представленных на рис. 1,а кинограмм следует, что частицы алюминия перемещаются в факеле по линиям тока (видны треки). Причем их воспламенение происходит только вблизи верхней границы пламени. В этой зоне заметно увеличение ширины треков и наблюдается образование субдисперсных продуктов реакции, что, в свою очередь, характеризует переход из кинетического режима окисления алюминия в стадию парофазного горения.

В случае приложения отрицательного потенциала $U = 0,9$ кВ к соплу горелки ги-

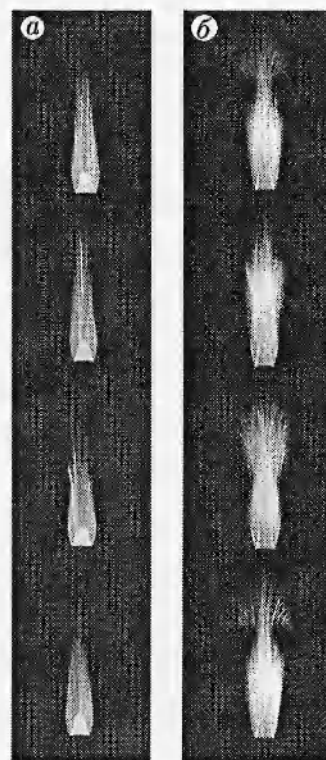


Рис. 1. Кинограммы ламинарного аэродисперсного пламени (скорость потока $u_0 = 68$ см/с):

а — $U = 0$, б — $U = 0,9$ кВ; скорость съемки 16 кадр/с

дродинимическая картина горения изменяется: наблюдаются периодические искривления поверхности пламени и отклонение траекторий горящих частиц в сторону сетчатого электрода (рис. 1,б). Это происходит за счет движения к цилиндрическому электроду частиц алюминия и его оксида. В результате этого дрейфа на сетке осаждаются субмикронные частицы Al_2O_3 и мелкие фракции непрореагировавшего металла. Одновременно зарегистрировано повышение электрической проводимости пламени, что обуславливает возрастание ионизационного то-

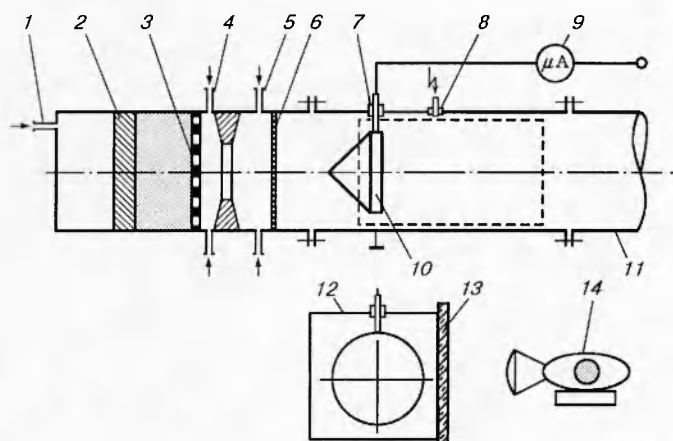


Рис. 2. Схема модельной установки: 1, 4, 5 — штуцеры, 2 — поршень, 3 — решетка, 6 — перфорированная пластина, 7 — керамический изолятор, 8 — электрическая свеча, 9 — микроамперметр, 10 — конический стабилизатор, 11 — цилиндрическая камера, 12 — рабочий участок, 13 — сменная прозрачная передняя стенка конструкции, 14 — кинокамера; штриховые линии — границы поля зрения кинокамеры

ка пламени с 1 (горение пропановоздушной смеси без частиц алюминия) до 100 мкА. Полученный результат объясняется электризацией частиц к-фазы, что может происходить за счет присоединения к поверхности частиц присутствующих в зоне горения носителей заряда и термоэлектронной эмиссии. Характерный размер горящих частиц алюминия более 1 мкм, и поэтому они приобретают заряд путем бомбардировки ионами, движущимися вдоль силовых линий ВЭП к поверхности [8]. Поскольку при горении в указанных условиях размер большинства частиц Al_2O_3 менее 0,1 мкм [11], механизм электризации может заключаться в «прилипании» к их поверхности отрицательных ионов и электронов, хаотически диффундирующих к частице оксида (диффузионная зарядка) [8].

В общем случае термоэлектронная эмиссия должна приводить к приобретению частицами положительного заряда независимо от направления поля. Причем это касается только частиц оксида, поскольку их температура в области горения достаточно высока (температура химической конденсации Al_2O_3 равна ≈ 3900 К). Однако этого не происходит, так как частицы к-фазы заряжаются отрицательно. Следовательно, можно сделать вывод о доминирующей роли механизма прилипания ионов.

Поскольку значительных изменений формы пламени вблизи сопла горелки не зарегистрировано, можно заключить, что ионный ветер, совпадающий с направлением движения положительных ионов и направленный к соплу горелки, не влияет на гидродинамическую картину горения. Кроме того, при изменении полярности прикладываемого напряжения не

обнаружено влияния ВЭП на аэродисперсное пламя, хотя оно оказывает воздействие на горение пропановоздушной смеси без ввода частиц ПМГ (см. результаты работы [14], полученные на этой же установке).

Следующей задачей работы являлось определение интенсифицирующего воздействия ВЭП на турбулентное горение аэрозвеси частиц алюминия, поскольку именно этот режим характерен для рабочих процессов в камерах сгорания энергетических и технологических аппаратов. Эксперименты проводили в модельной камере с прозрачной стенкой. В области за фронтом пламени поверхность стенки из полиметилметакрилата (ПММА), контактирующей с рабочим телом, оплавлялась и оставалась практически свободной от частиц к-фазы в течение всего времени работы установки (≈ 10 с). По всей вероятности, осаждению на поверхность дисперсной фазы препятствует массовый поток, возникающий в результате разложения органоластика. При этом относительно высокие значения скорости рабочего тела в камере сгорания ($8 \div 20$ м/с) способствуют уносу продуктов разложения ПММА и частиц к-фазы с поверхности стенки.

На рис. 2 представлена принципиальная схема модельной установки. Рабочий участок выполнен в виде конструкции со сменной прозрачной передней стенкой. Поперечное сечение конструкции 62×62 мм. Равенство площадей поперечных сечений рабочего участка и цилиндрической камеры диаметром 70 мм обеспечивает снижение гидравлических потерь. Киносъемку рабочего процесса проводили кинокамерой «Красногорск-3».

Для подачи ПМГ в камеру сгорания применяется бесфорсуночная вытеснительная си-

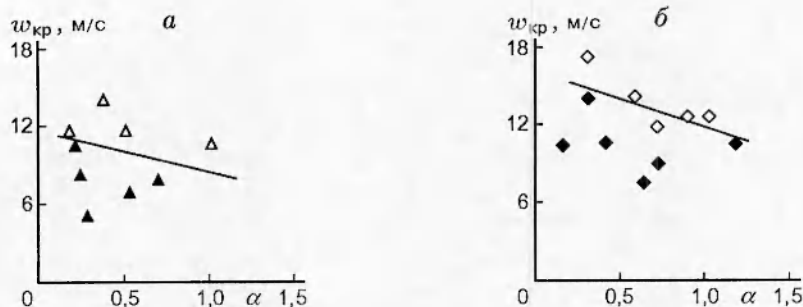


Рис. 3. Критическая скорость срыва пламени:

светлые значки — срыв пламени, черные — устойчивое горение, $p = 0,1$ МПа; a — $U = 0$, b — $U = 0,9$ кВ

стема. В полость перед поршнем через штуцер 1 подается воздух. Находящееся в баке ПМГ поджигается поршнем к решетке. Псевдоожигание порошка происходит за счет обдува поверхности решетки вспомогательным воздухом, подаваемым по штуцерам 4. Причем, изменяя коэффициент живого сечения решетки и расход вспомогательного воздуха, можно варьировать коэффициент избытка окислителя в диапазоне $0,1 \div 2$. Основной расход воздуха поступает в камеру сгорания через штуцеры 5. Для уменьшения неоднородности поля скоростей на входе в рабочий участок устанавливается перфорированная пластина с отверстиями диаметром 1,9 мм и коэффициентом живого сечения 0,25. Соотношение массовых расходов основного и вспомогательного воздуха в зависимости от режима работы установки составляет $0,62 \div 1,78$.

Воспламенение аэровзвеси частиц ПМГ осуществляется электроискровым способом с использованием катушки зажигания мощностью 100 Вт. После воспламенения (что контролировалось визуально через прозрачный элемент) электрическая свеча отключалась.

Фронт пламени стабилизировался за плохообтекаемым телом — прямым конусом с углом при вершине 90° и диаметром основания 40 мм (степень загромождения поперечного сечения 34%). Камера сгорания заземлялась, а к электрически изолированному конусу прикладывался отрицательный потенциал 0,9 кВ. Таким образом реализовывалась продольно-поперечная схема наложения ВЭП.

В экспериментах определялась скорость турбулентного горения аэровзвеси. Ее оценивали по критическому значению скорости потока перед стабилизатором $w_{кр}$: если скорость турбулентного горения аэровзвеси превыша-

ет $w_{кр}$, то процессы воспламенения и горения устойчивы (стабилизированный фронт пламени); в противном случае происходит срыв пламени и рабочий процесс прекращается. Этот режим соответствует неустойчивому рабочему процессу или неустановившемуся пламени.

Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 3. Как в отсутствие ВЭП, так и при его наложении наблюдается слабая зависимость $w_{кр}$ от α , что свидетельствует о преобладающем влиянии гидродинамических параметров потока на характеристики турбулентного горения аэровзвеси. Однако при наложении ВЭП значение $w_{кр}$ в $\approx 1,2$ раза (при $\alpha > 1$) и в 1,3 раза (при $\alpha \approx 0,2$) больше, чем при его отсутствии.

Полученные экспериментальные зависимости можно объяснить следующим образом. При горении топлива за плохообтекаемым телом возникают зоны рециркуляционного течения, непосредственно примыкающие к задней кромке стабилизатора [15]. Высокотемпературные продукты сгорания, заполняющие зону рециркуляции, обеспечивают постоянное воспламенение топливной смеси и стабилизируют пламя. Известно, что воздействие ВЭП на процессы воспламенения и горения осуществляется посредством ионного ветра (совпадающего с направлением движения положительных ионов) либо за счет интенсификации химических реакций в зоне подготовки. Поэтому при приложении к стабилизатору отрицательного потенциала ионный ветер, перемещающий с собой микрообъемы горячих газов, направлен к основанию конуса, что и обуславливает интенсификацию процессов тепло- и массообмена между продуктами сгорания и свежей топливной смесью, а также повышение $w_{кр}$.

Киносъемка позволила установить каче-

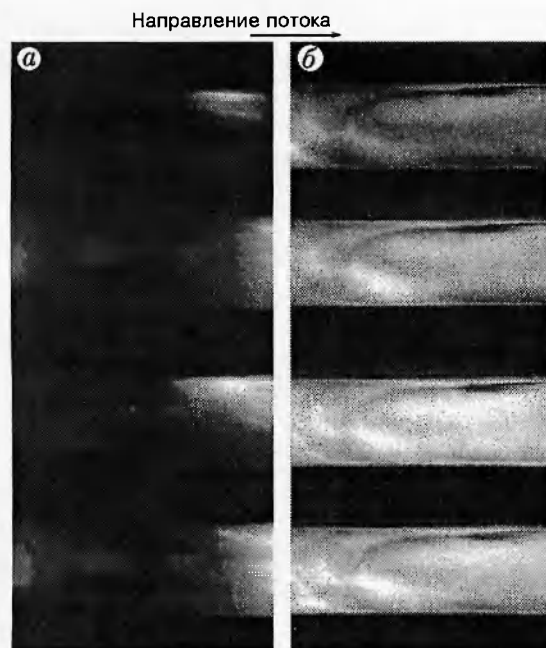


Рис. 4. Кинограммы стабилизации турбулентного пламени ($u_0 = 10,5$ м/с, $\alpha = 1,1$):

а — $U = 0$, б — $U = 0,9$ кВ; скорость съемки 24 кадр/с

ственные различия процессов горения гомогенных топливных композиций и алюминиево-воздушной смеси в условиях наложения ВЭП. В последнем случае при горении образуются субдисперсные частицы конденсированного оксида алюминия, температура которых в зоне горения приближается к температуре химической конденсации Al_2O_3 (≈ 3900 К). Находясь в электрическом поле, частицы к-фазы электризуются, как уже отмечалось, в основном за счет «прилипания» свободных электронов и отрицательных ионов к их поверхности. Приобретая отрицательный заряд, частицы к-фазы перемещаются к положительно заряженным стенкам рабочего участка, в результате изменяется гидродинамическая картина течения. На кинограммах видно, что при $U = 0$ (рис. 4, а) за стабилизатором образуется хорошо различимая рециркуляционная зона, поверхность которой близка к конической. В условиях данных экспериментов значение $w_{кр}$ оказалось меньше u_0 , и при повторном включении электрической свечи воспламенение и срыв пламени периодически повторялись.

Наложение ВЭП приводит к расширению границ пламени (рис. 4, б) и нарушению регулярной структуры течения, что также способствует увеличению объема зоны обратных

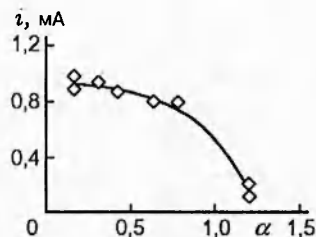


Рис. 5. Ионизационный ток i в пламени

токов и интенсификации процессов воспламенения и горения аэрозвеси частиц ПМГ. Полученный результат качественно согласуется с данными работы [16], где показано, что наложение ВЭП на зону горения спиртовоздушной смеси в турбулентном потоке расширяет верхний концентрационный предел стабилизации пламени на 23 %.

В работе проведено измерение ионизационного тока i аэродисперсного пламени, для чего в высоковольтную цепь установлен микроамперметр (см. рис. 2). Как следует из рис. 5, значение i возрастает при уменьшении α , поскольку увеличивается концентрация частиц к-фазы и, следовательно, носителей заряда. Заметим, что при $U = 0,9$ кВ и наибольшем ионизационном токе (≈ 1 мА) выделяемая джоулева мощность составляет $\approx 0,9$ Вт и не может оказать воздействия на процессы воспламенения и горения аэрозвеси алюминия.

Таким образом, на основе проведенных исследований установлено, что ВЭП позволяет повышать скорость горения аэрозвеси алюминия и изменять геометрические характеристики пламени. Следует также отметить, что положительный результат получен в условиях развитого турбулентного течения и может служить основой для разработки практических рекомендаций по интенсификации процессов воспламенения и горения не только в лабораторных условиях (ламинарный поток), но и в камерах сгорания энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И. Пути модификации металлического горючего конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 1. С. 97–104.
2. Ягодников Д. А., Воронежский А. В., Мальцев В. М., Селезнев В. А. О возможности увеличения скорости распространения фронта пламени в аэрозвеси алюминия //

- Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 2. С. 51–54.
3. Ягодников Д. А., Воронежский А. В. Экспериментально-теоретическое исследование воспламенения и горения взрывзвеси капсулированных частиц алюминия // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 1. С. 60–68.
 4. Ромоданова Л. Д., Похил П. Ф. О механизме действия двуокси кремния на скорость горения составов // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 3. С. 285–290.
 5. Ксенофонов С. И., Денисов Ф. Т. Распределение заряженных частиц по высоте углеводородного пламени, содержащего металл // Электрофизика горения. Караганда: ХМИ АН КазССР, 1987. С. 32.
 6. Флорко А. В., Козицкий С. В., Золотко А. Н., Головкин В. В. О механизме переноса конденсированных продуктов сгорания на поверхность горящей частицы магния // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 6. С. 24–29.
 7. Флорко А. В., Альтман И. С., Полетаев Н. И. О возможности определения дисперсности продуктов сгорания алюминия и магния по спектрам излучения // Химическая физика процессов горения и взрыва: Горение. Черногоровка, 1992. С. 79–80.
 8. Лаутон Д., Вейнберг Ф. Электрические аспекты горения / Пер. с англ. Н. М. Вентцель, И. Я. Полонского. М.: Энергия, 1976.
 9. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов / Г. Б. Синярев, Н. А. Ватолин, Б. Г. Трусов, Г. К. Моисеев. М.: Наука, 1982.
 10. Пилюгин Н. Н., Пилюгин А. Н. О восстановлении констант скоростей неравновесных реакций в газах с участием электронов из баллистических экспериментов // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 39–51.
 11. Агеев Н. Д., Вовчук Я. И., Горошин С. В. и др. Стационарное горение газозвесей твердых горючих. Ламинарный диффузионный двухфазный факел // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 54–62.
 12. Шацкий О. Е., Шербаков А. А., Власов Ю. Н. Потеря псевдооживленных порошков в режиме заторможенного плотного слоя // Процессы горения и охраны окружающей среды. Рыбинск: РАТИ, 1993. С. 43–47.
 13. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др. М.: Высш. шк., 1983.
 14. Ягодников Д. А., Воронежский А. В. Особенности стабилизации пропановоздушного пламени при наложении продольного и поперечного электрического поля // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 1. С. 40–45.
 15. Физические основы рабочего процесса в камере сгорания воздушно-реактивного двигателя / Б. В. Раушенбах, С. А. Белый, И. В. Беспалов и др. М.: Машиностроение, 1964.
 16. Yagodnikov D. A., Voronetskii A. V. The effect of electric field on ignition and combustion processes of combustible cases, dust, and liquids // Combustion, Detonation, Shock Waves. M.: Semenov Inst. of Chem. Phys., 1994. V. 2. P. 87–90.

Поступила в редакцию 26/XI 1997 г.,
в окончательном варианте — 23/III 1998 г.