

15. Е. С. Шетинков. Физика горения газов. М., «Наука», 1965, с. 292, 290.
16. R. Burke, A. Van Tiggelen. Bull. Soc. Chim. Belges, 1965, 74, 426.
17. Н. А. Нестерко, В. С. Россихин, В. И. Твердохлебов. ЖФХ, 1963, 37, 4, 940.
18. H. F. Calcote. ARS J., 1962, 32, 7, 1137.
19. Л. А. Гуссак, Е. С. Семенов. ФГВ, 1975, 11, 6, 830.
20. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., Изд-во МГУ, 1957, с. 144, 145, 155.
21. В. П. Карпов, А. С. Соколик. Докл. АН СССР, 1961, 138, 4, 874.

## О МЕХАНИЗМЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВО ВСТРЕЧНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

М. В. Алексеев, А. Э. Аверсон

(Чебоксары)

Процесс распространения пламени по поверхности наименее изучен в теории горения, хотя упоминание о нем имеется еще в работе [1]. Известно, например, что при горении образцов в атмосфере различных газов образуется «конус горения», в результате чего скорость сгорания образца отличается от собственной скорости горения. Чтобы устранить этот эффект, при изучении процессов горения обычно применяют различного рода бронировки, замедляющие процесс распространения пламени по поверхности. Однако причины, вызывающие более быстрое распространение пламени по поверхности по сравнению с распространением в глубь вещества, до сих пор остаются невыясненными. В [1] в качестве одной из таких причин называется наличие вторичных реакций окисления в газовой фазе, способствующих увеличению потока тепла к невоспламенившейся поверхности. В то же время известно, что конус образуется и в инертной атмосфере, а величина его зависит от геометрии и размеров образца и от давления.

Остается невыясненным и механизм распространения пламени по поверхности веществ, не только способных к горению в инертной атмосфере, но и таких горючих, как полимеры, древесина, бумага и т. д. [2—4], для горения которых необходимо присутствие окислителя в окружающей газовой среде.

Отметим, что данные о распространении пламени по поверхности твердых горючих веществ получены в основном в «спокойной» среде, т. е. в отсутствии обдувающего потока газа. Влияние скорости движения газа на распространение пламени по поверхности рассмотрено в работах [5—14]. Если направление скорости обдувающего потока газа ( $v$ ) совпадает с направлением скорости распространения пламени по поверхности ( $u$ ), то во всех случаях наблюдается рост  $u$  при увеличении  $v$  [5—9]. Этот факт объясняется просто интенсификацией теплопередачи к свежей невоспламенившейся поверхности за счет заноса факела пламени перед фронтом распространения.

В случае встречного потока газа такой однозначной зависимости уже нет.

Например, для лесных горючих материалов скорость распространения пламени с увеличением скорости встречного потока воздуха либо незначительно уменьшается, либо остается практически постоянной [8, 9]. Распространение пламени по фильтровальной бумаге при небольших скоростях встречного потока воздуха происходило с постоянной скоростью, а дальнейшее увеличение скорости потока уменьшало величину  $u$  вплоть до погасания [10, 11]. Исследования распространения пламени по поверхности ПММА и смеси ПХА с ПММА показывают, что  $u$  растет с увеличением  $v$  до тех пор, пока не будет достигнута критическая скорость встречного потока газа ( $v_{кр}$ ), а дальнейший рост  $v$

вызывает уменьшение  $u$  [12—14]. При распространении пламени вдоль цилиндрических стержней стали X18H9 во встречном потоке кислорода происходит также увеличение скорости распространения пламени, а затем наблюдается его срыв [15].

Существующие теоретические модели распространения диффузионного пламени по поверхности горючего материала [4, 16] позволяют объяснить лишь отдельные участки кривой зависимости  $u(v)$ . Предполагают при этом, что процессы, происходящие в зоне воспламенения, т. е. на передней кромке пламени, имеют первостепенную важность для распространения пламени по поверхности твердых топлив [12]. Однако, насколько известно авторам, кроме работ [6, 11], где изучалось горение бумаги, в литературе почти нет сведений об исследованиях аэродинамики, распределения температуры и состава газа при распространении пламени по другим горючим материалам. Нет и единой точки зрения на механизм распространения пламени.

В данной работе поставлена задача исследования механизма распространения пламени по поверхности твердых топлив (ПММА, ПХА+ПММА) во встречном потоке газа оптическими методами визуализации.

Эксперименты проведены в прямоугольной горизонтальной трубе длиной  $\sim 2,0$  м. Размеры испытательной секции трубы составляли  $0,04 \times 0,04 \times 0,1$  м<sup>3</sup>. Обдуваемый образец толщиной 2—4 мм, шириной 8—12 мм и длиной 27,5—55 мм монтировался заподлицо вдоль оси трубы, причем его передний край располагался на расстоянии  $\sim 0,1$  м от выходного сечения испытательной секции; заднее сечение испытательной секции не закрывалось. Испытательная секция трубы снабжалась с трех сторон оптическими стеклами для кино съемки различными оптическими методами и для визуального наблюдения. В качестве рабочих газов в опытах использовались воздух, азот и кислород в различном соотношении. Для исследования зоны воспламенения впереди распространяющегося пламени по поверхности твердого топлива выбирались оптические методы, поскольку они позволяют визуализировать оптические неоднородности, возникающие за счет изменения температуры и концентрации в исследуемой области, не возмущая среду. Информация о фронте распространения пламени по поверхности получена с помощью методов Теплера и поляризационной интерферометрии бокового сдвига, которые реализованы на широко распространенном теневом приборе ИАБ-451 [17, 18]. При этом в качестве источников света использовались ртутная лампа ДРШ-250 и газовый лазер ЛГ-38. Киносъемка производилась камерами СКС-1М и «Красногорск-2».

Визуализация картины течения газа впереди распространяющегося пламени осуществлялась введением частиц окиси магния [19]. Для подсветки частиц применялись лазеры ЛГ-38 и ЛГ-31, а также кварцевая галогенная лампа КГМ-24-150.

Для исследования потока тепла от фронта пламени к невоспламеняемой поверхности твердого топлива использовались две медьконстантановые термопары (40 мкм), которые находились на стенке трубы на различных расстояниях от переднего края образца. Образцы зажигались нихромовой проволокой, накаливаемой электрическим током. Электрические сигналы записывались на шлейфовом осциллографе типа Н-700. Скорость потока определялась расходомером и комбинированной трубкой полного и статического давления [20] с помощью микроманометра ММН. Скорость распространения пламени по поверхности определялась киносъемкой.

На рис. 1 приведены зависимости скорости распространения пламени по поверхности смеси ПХА (85%) + ПММА (15%) от массовой скорости встречного потока ( $\rho_{\infty} v$ ) различных газов. Характерно для всех кривых наличие максимума зависимости  $u(\rho_{\infty} v)$  при некотором значе-

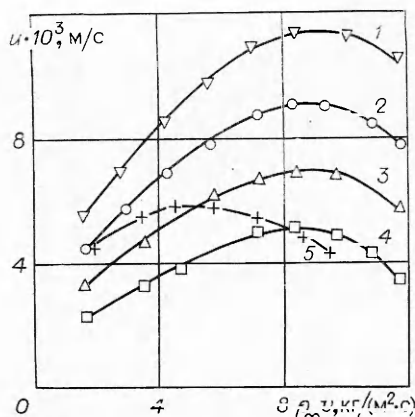


Рис. 1. Зависимость скорости распространения пламени по смеси ПХА+ПММА (1-4) и чистому ПММА (5) от массовой скорости встречного потока газов.

1 — воздух,  $T=453$  К; 2 — кислород,  $T=293$  К; 3 — воздух,  $T=293$  К; 4 — азот,  $T=293$  К; 5 — кислород,  $T=293$  К.

чистого ПММА достигается при меньших значениях  $\rho_{\infty}v$ , чем для смеси ПХА+ПММА (см. рис. 1, 2).

Наблюдаемые особенности начального роста, а затем спада зависимости скорости распространения пламени по поверхности твердых топлив от скорости встречного потока газа связать с поступлением в зону реакции дополнительного количества реагентов, вплоть до величины, максимально возможной в данных условиях, и с охлаждающим эффектом встречного потока газа (например, в случае инертного газа) не представляется возможным, как это делается, например, при объяснении устойчивости пламен твердых горючих в потоке воздуха [21]. Поэтому возникла необходимость более детально исследовать переднюю кромку (носик) распространяющегося фронта пламени по поверхности твердых топлив во встречном потоке газа.

Некоторые сведения об этом процессе дает визуализация введенных во встречный поток небольших частиц окиси магния. Фотоснимки на рис. 2 соответствуют разным последовательным моментам (24 кадр/с) процесса распространения пламени по поверхности смеси ПХА+ПММА при скорости обдувающего встречного потока воздуха  $v=1,8$  м/с; видны резкая граница распространяющегося фронта пламени и вихри на передней кромке (носике) пламени. Такая четко выраженная картина вихреобразования наблюдается не при всех значениях скорости обдувающего потока. По-видимому, это связано с тем, что взаимодействие потока с факелом пламени приводит к различным наклонам последнего относительно направления распространения пламени. В области малых скоростей обдувающего потока, где  $u(\rho_{\infty}v)$  возрастает, наблюдается и четкая картина вихреобразования, а угол наклона переднего фронта меньше, чем при больших скоростях. Как видно из рис. 2, основной вихрь впереди фронта пламени относительно него совершает продольные колебания, а его размеры не остаются постоянными. Вихри наблюдаются также и при распространении пламени по поверхности ПММА во встречном потоке кислорода (рис. 3), но в этом случае вихреобразование оказывается менее ярко выраженным. Угол наклона фронта распространения пламени по ПММА больше, чем по смеси ПХА+ПММА, а размеры отрывной зоны и основного вихря меньше.

Известно, что взаимодействие внешнего обдувающего потока газа с потоком со стенки (испарение, возгонка, впрыскивание, горение и

нии скорости потока. Изменение температуры газа-окислителя и даже замена его на инертный газ не приводит к качественному изменению картины распространения пламени по поверхности, хотя значение  $u$  в инертном газе (азоте) меньше, чем в потоке окислителя. По-видимому, уменьшение  $u$  связано с эффектом догорания продуктов первичного разложения, который в инертной атмосфере отсутствует, что приводит к уменьшению величины теплового потока к невоспламенившимся участкам поверхности. Другой причиной может быть ухудшение условий для диффузии окислителя и горючего, оттекающих с поверхности.

Аналогичный характер зависимости  $u(\rho_{\infty}v)$  наблюдается и в случае диффузионного горения чистого ПММА в атмосфере кислорода (см. рис. 1, 5). Однако максимум величины  $u$  для

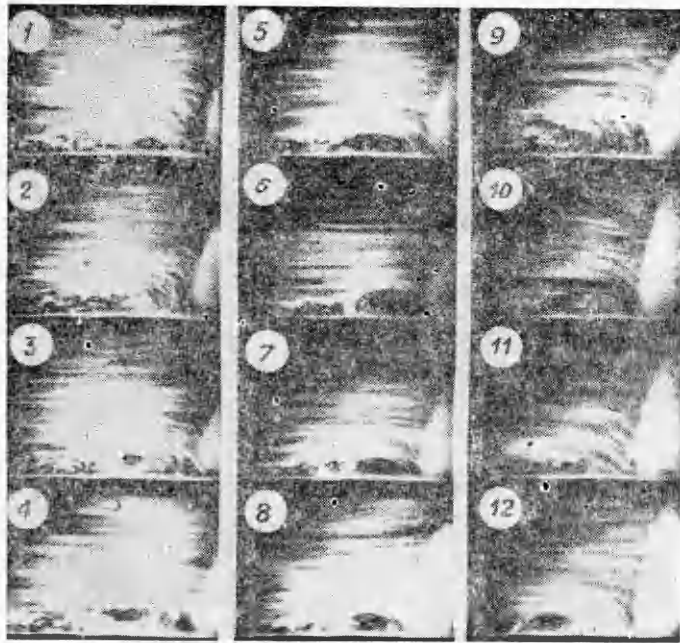


Рис. 2. Картина отрыва пограничного слоя при распространении пламени по поверхности смеси ПХА+ПММА во встречном потоке воздуха.

т. д.) в зависимости от относительной массовой скорости  $j = \rho u / \rho_{\infty} v$  (где  $\rho u$  — массовая скорость «вдува») приводит к различному поведению пограничного слоя. Если массовые скорости «вдува» и основного потока газа оказываются соизмеримыми, то в этом случае допущения теории пограничного слоя применять нельзя [22], и могут наблюдаться течения, подобные отрывным течениям в диффузоре [23], или как при обтекании потоком газа выступа на стенке [24]. С этих позиций проанализированы зависимости  $u(\rho_{\infty} v)$ , полученные авторами в [13, 14] и другими исследователями [7, 8, 10, 11].

При распространении пламени по смеси ПХА+ПММА во встречном потоке инертного газа (а в воздухе и в кислороде тем более) и по ПММА в потоке кислорода на начальном участке кривой  $u(\rho_{\infty} v)$  выполняются условия отрыва пограничного слоя<sup>1</sup> ( $j \geq 1$ ) и образования вихрей впереди фронта, распространяющегося по поверхности пламени. Для других горючих материалов [7, 8, 10, 11], а также на спадающем участке кривой  $u(\rho_{\infty} v)$  для смеси ПХА+ПММА [13] оценочные расчеты показывают, что  $j$  заведомо меньше единицы, поэтому отрыва пограничного слоя нет и, следовательно, условия для образования вихрей впереди кромки пламени не выполняются.

Ниже приведен конкретный случай оценки  $j$  при распространении пламени по поверхности смеси ПХА+ПММА в потоке азота.

$\rho_{\infty} v,$ кг/(м <sup>2</sup> ·с)	1,53	3,62	6,02	7,23	8,44	10,84	12,05
$j = \frac{\rho u}{\rho_{\infty} v}$	2,30	1,33	1,29	1,06	0,88	0,60	<b>0,42</b>

Видно, что  $j$  принимает в зависимости от  $\rho_{\infty} v$  различные значения. При

<sup>1</sup> Массовый поток «вдува» в первом приближении считался равным произведению плотности образца  $\rho$  на скорость распространения пламени  $u$ .

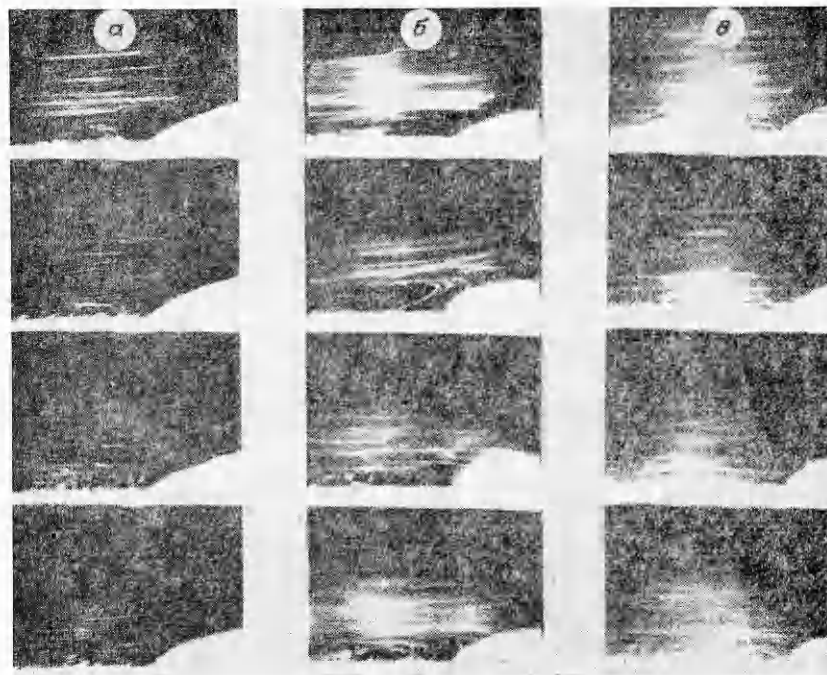


Рис. 3. Вихреобразование при распространении пламени по ПММА в потоке кислорода со скоростью  $v$ , м/с:  
а) 1,3; б) 2,4; в) 4,0.

этом оказывается, что скорость распространения пламени достигает максимальной величины, когда  $j \sim 1$  (см. также рис. 1).

Можно предположить, что образование вихрей впереди пламени, распространяющегося по поверхности во встречном потоке газа, вызывает при некоторых  $\rho_{\infty}v$  увеличение  $u$  из-за улучшения условий для тепло- и массопереноса к невоспламененной части поверхности образца.

Скоростная шлирен-киносъемка (частота 1300 кадр/с) процесса распространения пламени показала (последовательные фрагменты приведены на рис. 4), что в вихревом движении впереди фронта пламени действительно участвуют нагретые газы (продукты горения) с носика факела пламени. Направление вращения вихря способствует «втягиванию» горячих продуктов горения в зону прогрева. Нагретые газы отрываются с носика пламени, вовлекаются в вихревое движение и со временем исчезают, так как происходит их охлаждение и перемешивание с газом обдувающего потока. Следовательно, элементы поверхности образца, лежащие впереди фронта пламени, получают дополнительную тепловую энергию и прогрессуются, что в конечном итоге ведет к увеличению скорости распространения пламени по поверхности.

В условиях спокойной атмосферы ( $v=0$ ) впереди фронта пламени никакие оптические однородности не обнаружены. Известно, однако, что при больших скоростях распространения ( $u \sim 3-10$  м/с) и в спокойной атмосфере могут возникнуть вихри впереди движущегося фронта пламени [25]. Обработка скоростных шлирен-кинофильмов процесса распространения пламени позволила установить, что участие нагретых газов в вихревом движении происходит нерегулярно. Однако можно заметить, что средняя частота участия продуктов горения с носика пламени во вращательном движении ( $f$ ) на возрастающем участке кривой  $u(\rho_{\infty}v)$  также растет вместе с  $\rho_{\infty}v$ . Дальнейший рост  $\rho_{\infty}v$  уменьшает  $f$  и также  $u$  (см. рис. 1). В этом случае на шлирен-кинофильмах

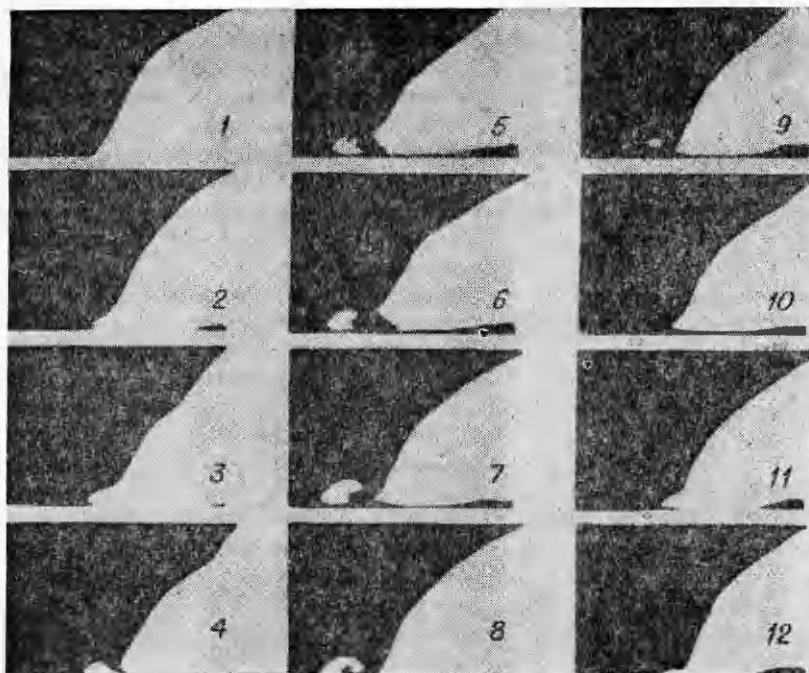


Рис. 4. Шлирен-киносъемка процесса распространения пламени по поверхности ПХА+ПММА во встречном потоке воздуха ( $v=3,0$  м/с).

хорошо просматривается лишь отрыв нагретых газов с носика пламени, а участие их в вихревом движении не наблюдается, так как сразу, видимо, происходит их перемешивание с обдувающим потоком газа. К тому же условия для образования вихрей также ухудшаются. На этом же участке кривой  $u(\rho_\infty v)$  увеличивается угол наклона пламени, т. е. факел пламени все сильнее наклоняется в сторону обдува и размеры «застойной зоны» впереди фронта пламени также уменьшаются (см. рис. 3).

Одновременно в экспериментах имелась возможность регистрировать разогрев еще невоспламененных точек поверхности образца впереди распространяющегося пламени с помощью медьконстантановых термопар, расположенных как на поверхности самого образца, так и на стенке трубки впереди образца на определенных расстояниях.

Первая термопара, которая находится от образца на расстоянии  $2,3 \cdot 10^{-3}$  м вниз по потоку вдоль центральной линии трубы, не только получает больше тепла, но и начинает реагировать раньше на приближение фронта пламени, чем вторая, которая находится на расстоянии  $6,0 \cdot 10^{-3}$  м от образца. Если поток газа над поверхностью отсутствует ( $v=0$  м/с) или скорость потока большая ( $v > 10$  м/с), то термопара, которая находится на расстоянии  $6,0 \cdot 10^{-3}$  м, никак не реагирует на приближение фронта пламени, а точки поверхности, расположенные ближе, плавно разогреваются по мере приближения фронта пламени. В то же время при умеренных скоростях потока ( $0 < v < 10$  м/с) наблюдается повышение температуры и в удаленных точках, причем это повышение во всех точках сопровождается значительными колебаниями. Оказывается, что степень разогрева точек поверхности образца, лежащих впереди фронта распространяющегося пламени, зависит от скорости встречного потока воздуха подобно зависимости  $u(\rho_\infty v)$ . Кроме того, на профилях температуры разогрева поверхности наблюдаются пульсации с амплитудами, достигающими до 50 К при максималь-

ных значениях скорости распространения пламени, при этом амплитуда пульсации так же сильно зависит от массовой скорости потока.

Исходя из проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы:

1) теплопередача к еще невоспламененной поверхности твердого топлива при распространении пламени (в частности, смеси ПХА+ПММА, ПММА в кислороде) определяется аэродинамикой турбулентного пограничного слоя;

2) в качестве безразмерного параметра, который может характеризовать данный процесс, в первом приближении можно принять параметр вдува  $j$ ;

3) при  $j \geq 1$  впереди фронта пламени происходит отрыв пограничного слоя, который за счет неустановившихся возвратных течений способствует улучшению периодического теплообмена между отрывной зоной и фронтом пламени и, следовательно, между поверхностью и отрывной зоной;

4) максимальное значение интенсивности теплообмена достигается при  $j \sim 1$ , когда и наблюдается максимум скорости распространения пламени;

5) при  $j < 1$  вихри впереди фронта пламени не образуются, а происходит лишь отеснение пограничного слоя [22] и теплообмен между фронтом пламени и лежащими впереди от него точками поверхности образца становится менее интенсивным, что ведет к уменьшению скорости распространения пламени.

Поступила в редакцию  
5/XII 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М., «Наука», 1966.
2. R. S. Magee, R. F. McAlvey. J. Fire and Flammability, 1971, 2, 10, 271.
3. W. A. Sirignano. Comb. Sci. Techn., 1972, 6, 1—2, 95.
4. С. С. Рыбанин.— В сб.: Горение гетерогенных и газовых систем. Черноголовка, ОИХФ АН СССР, 1977.
5. H. E. Anderson, R. C. Rothermal. 10-th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa, 1965.
6. T. Hirano, K. Sato. 15-th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. Pittsburgh, Pa, 1974.
7. А. С. Мелихов, В. В. Синельщикова и др.— В сб.: Вопросы горения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах. М., 1975.
8. А. И. Сухинин. Канд. дис. Красноярск, ИЛД СО АН СССР, 1975.
9. А. В. Филиппов.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 157—160.
10. M. Sibulkin, W. Ketelhut, S. Feldman. Comb. Sci. Techn., 1974, 9, 1—2, 75.
11. T. Hirano, K. Sato, K. Tazawa. Comb. and Flame, 1976, 26, 2, 191.
12. F. A. Lashina, R. S. Magee, R. F. McAlvey. 13-th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa, 1971.
13. М. В. Алексеев, А. Э. Аверсон, С. А. Абруков. Экспериментальное изучение процесса распространения пламени по поверхности твердых топлив. Деп. в ВИНТИ 20 сент. 1977 г. № 3744-77 Деп.
14. М. В. Алексеев, А. Э. Аверсон. V Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. Тез. докл. Одесса, 1977.
15. Б. А. Иванов. Безопасность применения материалов в контакте с кислородом. М., «Химия», 1974.
16. J. N. de Ris. 12-th Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa, 1969.
17. С. А. Абруков. Теневые и интерференционные методы исследования оптических неоднородностей. Казань, КГУ, 1962.
18. М. П. Михеев. Интерферометры сдвига. Чебоксары, Чуваш. ГУ, 1971.
19. С. С. Кутателадзе и др.— В сб.: Экспериментальное исследование пристеночных турбулентных течений. Новосибирск, «Наука», 1975.

20. Прикладная аэродинамика. Под ред. Н. Ф. Краснова. М., «Высшая школа», 1974.
21. В. М. Мальцев, М. И. Мальцев, Л. Я. Кашпоров. Основные характеристики горения. М., «Химия», 1977.
22. С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М., «Энергия», 1972.
23. А. И. Леонтьев, Б. П. Миронов.— В сб.: Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. Новосибирск, «Наука», 1974.
24. Г. Шлихтинг. Теория пограничного слоя. М., «Мир», 1974.
25. Ю. А. Гостинцев, С. С. Новиков, Л. А. Суханов. ФГВ, 1975, 11, 3.

## РАЗВИТИЕ МЕХАНИЗМА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В АЭРОДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМАХ

*К. К. Ионушас, Н. М. Проничева, О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер,  
В. И. Водяник, Н. П. Кожушков*

(Северодонецк)

Вопрос о механизме распространения зоны горения (фронта пламени) в конкретной среде имеет фундаментальное и чисто прикладное значение, так как им определяется производительность высокоинтенсивных энергетических установок и транспортных двигателей, а также — применительно к задачам техники безопасности — требуемое быстродействие и выбор метода подавления процесса горения (взрыва). Для аэрозвесей, как и для парогазовых смесей [1], характерны два возможных механизма распространения горения — теплофизический и газодинамический (к последнему относятся в общем случае конвекционный, турбулентный и ударно-волновой перенос), характеризующиеся соответствующими значениями скорости  $u$  и масштаба зоны горения  $\delta$ . Для газов, когда осуществляется один из газодинамических, за исключением детонации, режимов распространения пламени (а теплофизический сводится к кондуктивному),

$$u_k \ll u_g, \delta_k \ll \delta_g, \quad (1)$$

где  $k$  и  $g$  относятся соответственно к кондуктивному и газодинамическому режимам.

Особенность горения аэрозвесей твердых частиц в газе состоит в возможности чисто теплофизического механизма распространения пламени не только за счет кондукции, но и за счет излучения (радиации). В зависимости от относительной роли излучения и ведущей газодинамической стадии переноса возможны два случая:

$$u_k \ll u_r \ll u_p, \delta_k \ll \delta_r \ll \delta_p; \quad (2)$$

$$u_k \ll u_p \ll u_r, \delta_k \ll \delta_p \ll \delta_r. \quad (3)$$

Индекс  $p$  относится к радиационному режиму. При этом, естественно, в каждом из указанных вариантов реализуется режим с наибольшими  $u$  и  $\delta$ . Ранее в [2—9] теоретически и отчасти экспериментально изучен случай, отвечающий соотношению (2), т. е. преобладанию радиационного механизма переноса.

Известные из литературы и проводившиеся эксперименты по выявлению роли радиационного фактора в процессе распространения пламени можно подразделить на две группы: прямые доказательства возможности поджигания одиночных частиц и облаков аэрозвеси излучением и косвенные экспериментальные подтверждения наличия существенных лучистых потоков, прогревающих частицы перед фронтом пламени. Поджигание одиночных частиц [10, 11] внешним радиационным пото-