

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 δ . 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 δ . 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-

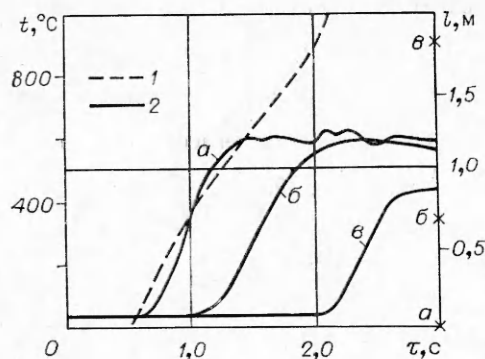


Рис. 1. Зависимость пути (l), пройденного пламенем полистирола ($d=150\div 300$ мкм, $C=210$ г/м³) (1) и температуры (2) от времени.

$a, б, в$ — показания термопар, установленных в соответственных местах трубы.

Эксперименты второй группы сводились к замеру радиационных потоков и температур частиц в горячей аэровзвеси: помимо известных результатов по определению радиационных потоков в угольных топках, обобщенных в [13], проведены непосредственные измерения температурных полей в аэровзвесах с распространяющимся фронтом пламени. Установка состояла из вертикальной стеклянной трубы круглого или прямоугольного сечения длиной 3 м. Аэровзвесь в трубе получалась с помощью дозатора порошка, расположенного в верхней части трубы. Поджигающее устройство располагалось в нижней части трубы. Измерялась температура частиц микротермопарами с синхронизацией положения фронта пламени. В ряде опытов микротермопары заделывались в частицу. Скорость горения замерялась с помощью фотодатчиков, расположенных по длине трубы на расстоянии 200 мм друг от друга, сигналы от которых выводились на шлейфовый осциллограф.

Несмотря на погрешность, вносимую, главным образом, различием теплофизических свойств материалов термопар и частиц, можно констатировать весьма крутой (рис. 1) фронт прогрева при значительных длинах пробега излучения. Это указывает, что по крайней мере в условиях данных опытов (взвеси угля, полистирола, крахмала, гидрохинона и алюминия концентрацией 150—300 г/м³) роль радиационного теплопереноса не была лимитирующей в процессе распространения пламени. Данный вывод подтверждается также отсутствием существенного влияния зачернения или, наоборот, нанесения зеркального покрытия на стенки трубы: различие в скорости фронта пламени при этом не выходило за пределы погрешности эксперимента (табл. 1).

Что касается порядков величин скоростей распространения пламени, то расчеты по теплофизическому механизму с радиационным пере-

ком, а также поджигание аэровзвеси стационарно горящим факелом [12] при исключении кондуктивных и газодинамических факторов показывает возможность создания положительного теплового баланса для частиц, несмотря на значительные (особенно у одиночных частиц) теплопотери. Попытка учесть временные факторы путем поджигания потока пыли, падающего в стеклянной трубе диаметром 55 мм фронтом пламени идентичного потока, распространявшимся вверх снаружи этой трубы, дала отрицательный результат; правда, в этих экспериментах тоже имели место неучитываемые теплопотери в стенке.

Таблица 1

Продукт	Концентрация, г/м ³	Значение скорости распространения пламени (м/с) в трубе		
		прозрачной	зеркальной	зачерненной
Уголь	280	0,57—0,7	0,83—1,0	0,72—0,93
Алюминий	170	0,66—0,73	0,67—0,83	0,6—0,79
Гидрохинон	160	0,8—0,98	0,8—0,96	0,76—0,9
Крахмал кукурузный	230	1,0—1,09	1,1—0,95	0,88—0,93

Т а б л и ц а 2

Тип режима	Концентрация частиц полистирола, г/м ³	Наблюдаемые скорости распространения, см/с	Наблюдаемые толщины зоны горения, см	Примечание
Низкоскоростной	40—60	10	1—3	Рис. 2, а; $u \approx u_k$
Среднескоростной	100—200	100	30—60	Рис. 2, б; $u \approx u_p$ с учетом теплопотерь
Высокоскоростной	100—200	500—700	300	Рис. 2, в; труба с открытым нижним и верхним концом

Примечание. Нижний концентрационный предел распространения пламени 20—30 г/м.

носом дают в зависимости от свойств дисперсной фазы значения u_p , 0,1—30 м/с [8, 9]. Экспериментальная проверка значений u затруднена в связи с зависимостью δ от характерного масштаба опытной установки, что приводит к обратной связи — влиянию типа последней на величину получаемого значения u . Это положение наглядно иллюстрируется данными 39 серий опытов по распространению фронта пламени по аэровзвеси (см. обзор [15]). Существенно, что полученные значения намного превышают верхнюю оценку для u_p , что заставляет предположить значительную, а зачастую и определяющую роль газодинамических (в основном конвекционных и ударно-волновых) режимов.

Ранее вопрос о существовании и взаимном переходе теплофизических и газодинамических режимов распространения пламени в аэровзвеси, за исключением качественных данных [16], насколько известно, не рассматривался. Известны лишь соображения [17, 18] по оценке вклада увеличения прогреваемых и горящих частиц расширяющимися при нагревании газами и работы [19, 20] по учету турбулизации аэровзвеси как внешними воздействиями, так и пламенем. Некоторые авторы [21—23] указывают также на возможность ускорения пламени и развития ударно-волнового механизма его распространения. Поэтому экспериментальное подтверждение существования и взаимного перехода различных тепловых и газодинамических режимов горения при неизменных параметрах эксперимента является задачей актуальной с теоретической и практической точек зрения.

Опыты проводились с аэровзвесьями полистирола, витана-2М и угольной пыли на укрупненно-лабораторных стендах прямоугольного сечения 150×150 мм и круглого — диаметром от 24 до 200 мм, высотой 3 м, снабженных кинофоторегистрацией, радиационно-пирометрическими и микротермопарными датчиками температуры и аппаратурой для измерения видимой скорости пламени. Часть экспериментов выполнена в крупномасштабной камере объемом 10 м³, высотой свыше

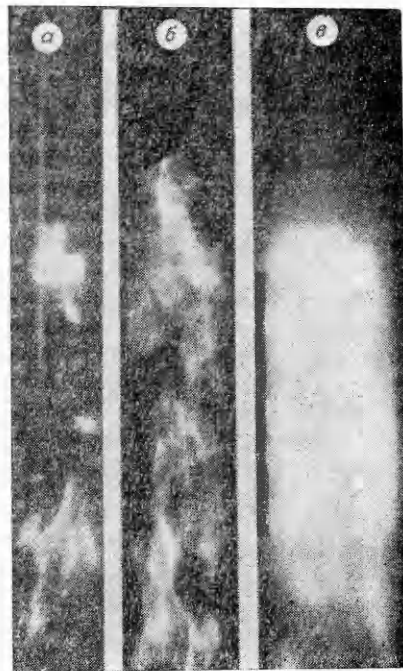


Рис. 2. Ширина зоны горения при низкоскоростном (а), среднескоростном (б) и высокоскоростном (в) режимах.

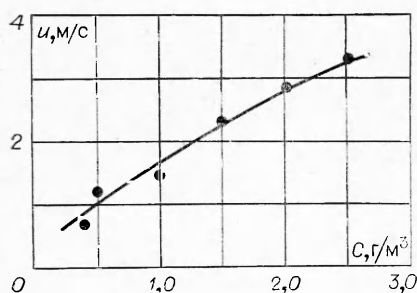


Рис. 3. Зависимость видимой скорости распространения пламени от концентрации для порошка Витан-2М.

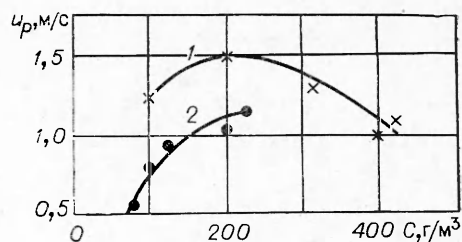


Рис. 4. Зависимость скорости пламени от концентрации горючего (полистирол $d = 150 \div 300$ мкм). 1 — пневмопитатель; 2 — вибропитатель.

5 м при диаметре 1,6 м, оборудованной фотодиодными и термопарными датчиками координат фронта пламени.

Хотя при характерных для частиц полистирола невысокой цветовой температуре (до 1200°C) и значительной прозрачности оплавившихся частиц роль чисторадиационного теплообмена не была лимитирующей (см. на рис. 1, весьма крутые графики прогрева), порядок скоростей пламени (1÷2 м/с) значительно превосходит оценки u_k и соизмерим с расчетными значениями u_p .

Следовательно, порядок величины u следует объяснить газодинамическими факторами.

Далее, для этой системы в зависимости от концентрации частиц и условий конвекции обнаружены несколько отличающихся по значениям u и δ режимов горения, имеющих, очевидно, газодинамическую природу.

Характеристики этих режимов приведены в табл. 2; картина зоны горения в каждом из них (низко-, средне- и высокоскоростном) наглядно видна на рис. 2.

Аналогичная картина газодинамического механизма распространения пламени, приводящего к соизмеримым с u_p порядком скоростей даже для легкоплавких, слабопоглощающих и дающих низкотемпературное пламя частиц, наблюдалась на большом стенде при горении облака частиц витана-2М (рис. 3).

Заметим, что для аэрозвеси полиэтилена наличие низко- и высокоскоростных режимов распространения обнаружено в [24]. Близкая классификация режимов с тонким и широким фронтом при распространении от закрытого и открытого конца трубы приведена в работе [16] на основе экспериментов с регистрацией пламени аэрозвесей методом фоторазвертки.

Наконец, весьма наглядны для иллюстрации существенной роли газодинамических факторов результаты серии опытов с различными условиями движения облака аэрозвеси и продуктов сгорания (рис. 4). Эти, а также другие известные данные для нестационарного горения газов [25] показывают разнообразие и взаимосвязь возможных газодинамических режимов распространения пламени в аэрозвеси. При этом не следует недооценивать и вклад турбулентных пульсаций, интенсифицируемых потоком частиц.

Особое значение приобретает учет газодинамических факторов при рассмотрении сферически-симметричных пламен, в которых реализуется случай, аналогичный распространению от закрытого конца трубы с расширением продуктов сгорания.

Поступила в редакцию
2/XI 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М., Изд-во АН СССР, 1960.
2. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер и др.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
3. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер, Я. Г. Горбульский. Докл. АН СССР, 1972, 205, 5, 1083.
4. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер, С. А. Чивилихин. Докл. АН СССР, 1973, 213, 2, 321.
5. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер, К. К. Ионушас. ФГВ, 1974, 10, 1, 83.
6. R. H. Essenhigh, J. Csaba. IX-th Symposium International on Combustion. 4, London, 1963.
7. Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин.—В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
8. Г. Е. Озерова, А. М. Стеианов. ФГВ, 1973, 9, 5, 627.
9. Р. А. Барлас.—В сб.: Технология получения новых материалов. Киев, изд. ИПМ АН УССР, 1972.
10. Г. М. Горбовицкий. Дипломная работа, ВВИТКУ — ЛПИ, Л., 1972.
11. D. Anson. Comb. and Flame, 1971, 16, 3, 265.
12. G. Leuschke. Staub, 1965, 25, 5, 180.
13. А. Г. Блох. Основы теплообмена излучения. М.—Л., ГЭИ, 1962.
14. П. Б. Вайнштейн, Р. И. Нигматуллин. ПМТФ, 1971, 4, 19.
15. О. М. Тодес, А. Д. Гольцикер и др. Механизм развития пылевых взрывов. М., НИИТЭХИМ, 1977.
16. Г. М. Кассель, А. К. Дас-Гупта, С. Гурусвами.—В сб.: Вопросы горения. М., ИЛ., 1953.
17. Essenhigh, D. W. Woodhead. Comb. and Flame, 1958, 2, 4, 365.
18. K. W. Palmer, P. S. Tonkin. J. Chem. Engineering Science, Sympos. Series, 1958, 25.
19. I. Nagy, E. Seiler et. al. U. S. Bureau of Mines, Report. of Investigation, 1971, 7507.
20. В. Б. Либрович, В. И. Лисицын. Тез. докл. Всесоюзной школы-конференции по теории горения, ИПМ АН СССР, М., 1975.
21. Strauss. AIAA J. 1968, 6, 9, 1753.
22. Nefflefon. Comb. and Flame, 1974, 18, 3.
23. W. B. Subulski. Detonation of Coal Dust, 1971, 381.
24. R. N. Butlin. Comb. and Flame, 1966, 10, 3.
25. Г. Генюш.—В сб.: Нестационарное распространение пламени. Под ред. Дж. Г. Маркштейна. М., «Мир», 1968.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ СМЕСЕЙ ВЫСШИХ ХЛОРИДОВ КРЕМНИЯ С ВОЗДУХОМ. I. ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМЕСЕЙ ГЕКСАХЛОРИДИСИЛАНА С ВОЗДУХОМ

*В. Ф. Кочубей, А. П. Гаврилив, Ф. Б. Моин,
Ю. А. Паздерский
(Борислав)*

Потребление высших хлоридов кремния в электронной промышленности и для кремнийорганического синтеза с каждым годом возрастает. В этой связи проведение работ по исследованию физико-химических свойств высших хлоридов кремния представляет несомненный теоретический интерес и имеет важное практическое значение.

Авторами впервые установлено, что газовые смеси высших хлоридов кремния с воздухом и кислородом воспламеняются от искры. В настоящее время данные о закономерностях воспламенения кремнийхлоридов в смесях с воздухом и кислородом отсутствуют. Известна только работа [1], в которой изучено окисление тетрахлорсилана кислородом и показано, что реакция протекает при температурах выше 900°C весь