

ных образцов тепловой поток из газа может быть значительно выше, чем это следует из проведенного расчета при использовании величины λ для газа.

Поступила в редакцию 27/VI 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Зенин.— В кн.: Физический процесс при горении и взрыве. М.: Атомиздат, 1980.
2. В. М. Зинченко, Ю. С. Иващенко, В. С. Еремеева и др. ФГВ, 1982, 18, 1, 135.
3. N. Kubota, T. J. Ohlemiller, L. H. Caveny a. o. AIAA J., 1974, 12, 1709.
4. А. П. Денисюк, А. Е. Фогельзанг. Изв. вузов. Химия и хим. технология, 1971, XIV, 6, 861.
5. А. А. Зенин. Канд. дис., ИХФ АН СССР, 1962.
6. К. К. Андреев. Термическое разложение и горение взрывчатых веществ. М.: Наука, 1966.
7. В. Э. Анников, Б. Н. Кондриков, Н. А. Полякова. ФГВ, 1969, 5, 1, 60.
8. В. И. Перельман. Краткий справочник химика. М.—Л.: Химия, 1964.
9. А. П. Денисюк, Т. М. Козырева, В. Г. Хубаев. ФГВ, 1975, 11, 2, 315.
10. А. П. Денисюк, А. Д. Марголин, Н. П. Токарев и др. ФГВ, 1977, 13, 4, 576.

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ПЫЛЕЙ В УДАРНЫХ ВОЛНАХ

П. Воляньски
(Варшава)

Исследования воспламенения и горения органических пылей в ударных волнах проводятся уже несколько лет, но лишь в последнее время количество публикаций на эту тему значительно возросло. Это связано, в частности, с постоянно растущей угрозой взрывов промышленных пылей.

Пылевые взрывы часто бывают вызваны местными слабыми взрывами, сами взрывы могут быть также источником ударных волн. Итак, существенным элементом большинства пылевых взрывов являются ударные волны, которые могут вызвать воспламенение, интенсифицировать горение, а в итоге даже привести к детонационному горению.

В настоящей работе дан краткий обзор исследований воспламенения пылей за ударной волной, инициирования детонационного горения ударными волнами, а также исследований области протекания детонации в пылегазовых смесях. Обсуждение этих проблем проведено для органических пылей.

Воспламенение пыли в ударной волне

В [1, 2] изучалось воспламенение угольной пыли в ударных волнах, а также влияние добавок на ее горение в волнах. Много работ посвящено сельскохозяйственным и пищевым пылям [3—7]. Исследования угольной пыли в ударных волнах вместе с теоретическим анализом нагрева и воспламенения частицы угля содержатся в работе [8], а анализ воспламенения зерновых и угольных пылей проведен в [9].

Воспламенение органических пылей исследовалось в ударных трубах с использованием падающих и отраженных волн. Чаще всего распыление проводили непосредственно перед генерированием волны либо пыль размещали в слое на нижней стенке ударной трубы. Данные по воспламенению можно также (в ограниченных пределах) получать непосредственно из исследований пылевых детонаций.

Некоторые результаты по воспламенению показаны на рис. 1. Видно существование двух групп результатов. В одну из них входят пыли, воспламененные в падающей волне, в другую — в отраженной волне.

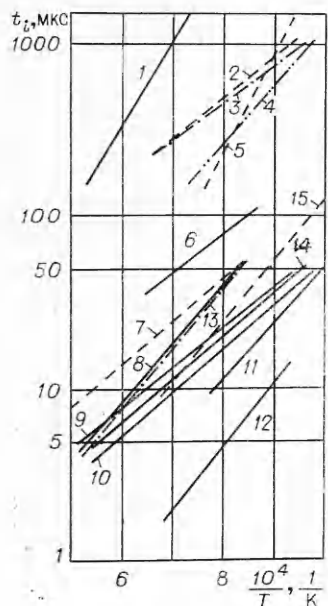


Рис. 1. Зависимость времени задержки воспламенения пылей в ударных волнах от обратной температуры за волной.

Данные, полученные в отраженной волне: 1 — каменный уголь (слой) [6]; 2—5 — соответственно пшеница, миде, кукуруза, соя (аэрозоль) [4]; данные, полученные за падающей волной: 6 — уголь (аэрозоль) [3], 7 — древесный уголь (призма) [10], 8 — пшеница (призма) [10], 9 — древесный уголь в кислороде (призма) [10], 10 — ликоподий в кислороде (призма) [10], 11 — миде (аэрозоль) [3], 12 — пшеница (аэрозоль) [3], 13 — ликоподий (призма) [10], 14 — пшеница в кислороде (призма) [10], 15 — мука (аэрозоль) [3].

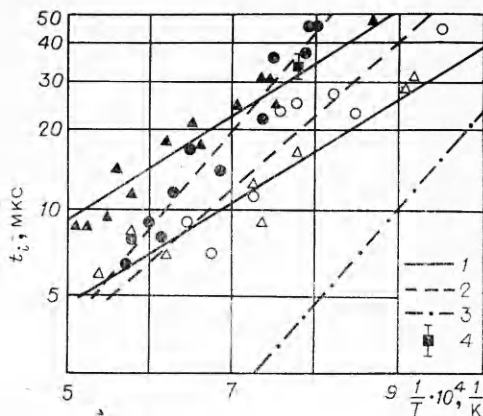


Рис. 2. Зависимость времени задержки воспламенения пыли пшеницы от обратной температуры за падающей волной.

Воспламенение слоя (1) и призмы (2) в воздухе (темные точки) и кислороде (светлые точки) [10]; 3 — данные для аэрозоля [3]; 4 — задержка, определенная из развертки детонации [5].

Отличия в способе размещения пыли вызывают лишь небольшие отклонения внутри отдельных групп.

Значительные различия во времени задержки воспламенения в отдельных группах следуют прежде всего из факта отнесения времени задержки за падающей волной к статической температуре за падающей волной. В действительности в случае воспламенения за падающей волной в начальной стадии существует значительное различие между скоростями частицы и газа. Это приводит к созданию вблизи частицы ударной волны. Температура газа между частицей и присоединенной волной значительно выше температуры за падающей волной и ускоряет воспламенение. Отнесение времени задержки воспламенения частиц за падающей волной к статической температуре за этой волной является некоторым упрощением, более желательным было бы отнесение этого времени к числу Маха падающей волны.

Влияние способа размещения пыли, вида окислителя, а также измерительной аппаратуры показано на рис. 2, где четко видно, что задержка воспламенения в значительной степени зависит от вида смеси в период воспламенения. Некоторые различия во времени могут возникать из-за произвольности определения момента начала воспламенения. Поэтому, в частности, невозможно безусловное сравнение результатов для одной и той же пыли в слое или призме, полученных в Варшавском политехническом институте и в университете Мичиган. Различия, появляющиеся в этом случае, обусловлены как расположением пыли в трубе, так и способом определения задержки воспламенения. Точное определение влияния способа размещения пылей может быть достигнуто лишь с помощью одной и той же аппаратуры.

Большое влияние на время задержки воспламенения оказывает содержание кислорода в атмосфере газового окислителя. Особенно сильное влияние кислорода можно наблюдать для малых чисел M (более длительные времена задержки воспламенения), тогда как при высоких температурах оно становится значительно меньше. Влияние способа разме-

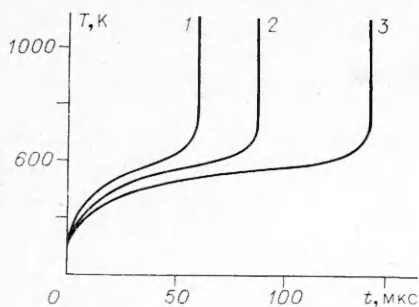


Рис. 3. Вычисленные изменения температуры частиц пыли во времени в зависимости от скорости ударной волны [10]; $E = 140$ кДж/моль, $k = 1 \cdot 10^{13}$, $d = 20$ мкм, $D = 1600$ (1), 1500 (2) и 1400 м/с (3).

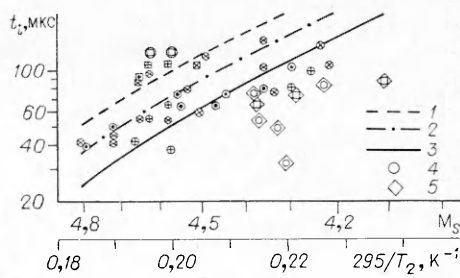


Рис. 4. Сопоставление зависимости времени задержки воспламенения угольных пылей от обратной температуры за волной, полученных в ударной трубе и на основе расчетов [8].
1 — воздух; 2 — 50% O₂; 3 — O₂; 4 — графит; 5 — древесный уголь.

щения пыли в более высоких температурах также изменяется. Для меньших чисел M воспламенение пыли в призме сложнее, чем в слое, тогда как при более высоких температурах наблюдается обратное явление. Это следует скорее всего из-за существования вблизи призмы областей, в которых температура сравнима с температурой за отраженной волной [10].

Подробный анализ воспламенения одиночных частиц за падающей волной проведен в [8, 9]. Расчет нагрева внешних слоев частицы угольной пыли в период воспламенения показывает, что в период задержки воспламенения нагревается лишь внешний (несколько микрон) слой частицы [8]. Для маленьких частиц с большой пористостью поверхности можно принять упрощение, предполагающее равномерный нагрев частиц по всей площади [9]. Изменения температуры частицы угля во времени, полученные по такой модели, показаны на рис. 3.

Численные расчеты времени задержки воспламенения в некоторых условиях хорошо описывают экспериментальные результаты. Данные на рис. 4 взяты из работы [8]. Четко видно, что для принятой модели зависимость логарифма времени задержки воспламенения в функции обратной температуры за падающей волной не является линейной зависимостью. Сильное влияние на задержку оказывает также увеличение содержания кислорода в атмосфере газового окислителя.

Из проведенных исследований воспламенения пылей в ударных волнах можно получить данные, описывающие кинетику воспламенения частиц. Энергия активации воспламенения органических пылей изменяется от 40 до 100 кДж/кмоль. Эти значения сопоставимы с энергией воспламенения углеводородов. Следует также добавить, что некоторые пыли характеризуются меньшей задержкой воспламенения за падающей волной, чем стехиометрическая водородокислородная смесь [6]. Лишь в некоторых работах получены более длительные времена задержки воспламенения, чем показанные на рис. 1 [11].

Полученные в исследованиях воспламенения результаты пригодны при оценке склонности данных пылей к детонационному горению. Таким свойством обладают пыли с большой пористостью, малым диаметром, большой массой и малым коэффициентом аэродинамического сопротивления частиц. В группу пылей, поддающихся детонационному горению, входят пыли овса и пшеницы, в меньшей степени — муки и угля. Микроскопические снимки этих пылей указывают на большие различия строения, особенно в структуре внешней поверхности. Следует также добавить, что большое влияние на характеристики воспламенения оказывают зернистость и влажность, а также способность пылей к созданию агломераций. Эти агломераты в начальном периоде разрушаются под воздействием волны, а их структура может оказывать влияние на воспламе-

нение, особенно в случаях больших чисел Маха и короткого времени задержки воспламенения.

Итак, органические пыли составляют очень большую группу пылей. Разнородность структуры, дисперсности и других физико-химических параметров приводит к значительному различию их характеристик воспламенения. По этой причине оказывается необходимым проведение дальнейших исследований с целью лучшего и более подробного изучения механизмов, руководящих процессами воспламенения в падающей или отраженной волне.

Детонация органических пылей

Возможность появления детонации в пылевых смесях доказана в [12], где приведены результаты опытов, в которых реализован переход пламени к детонации в смеси угольной пыли с воздухом в исследовательском штреке опытной шахты «Барбара». Возможность детонации смеси угольной пыли с воздухом подтверждена в [13], а в [14] представлены результаты детонации пигментных пылей. Доказано также, что органические пыли довольно легко могут детонировать в смесях с кислородом [3, 5, 15, 16].

Первые исследования показали, что детонация в пылевоздушных смесях может распространяться со скоростью от 1300 до 2000 м/с, а давление во фронте детонации может достигать 5 МПа. Произвольный переход к детонации возможен, если пламя распространяется в длинном канале. Подробные исследования инициирования, диапазонов и структуры пылевоздушной детонации проведены в [3, 5, 7, 17], а численный анализ структуры детонации зерновой пыли с воздухом представлен в работе [18].

Детонация в лабораторных исследованиях инициируется чаще всего ударной волной или сильным источником воспламенения. На рис. 5 показано изменение скорости волны в смеси пыли овса с воздухом при разных концентрациях пыли и одной и той же энергии инициатора. Четко видно, что лишь в одном случае наблюдается переход скорости на детонационный режим, тогда как в двух других случаях происходит затухание детонационного горения. Переход к детонации может также произойти путем ускорения пламени. Для реализации такого случая необходимо использовать (в лабораторных условиях) пылекислородные смеси. В смесях с воздухом в опытах детонируют только некоторые пыли. Доказано, что пыли пшеницы детонируют в диапазоне концентрации 0,250—0,305, а овса при 0,220 ÷ 0,275 кг/м³. Этот диапазон значительно расширяется, если смеси при взрыве обогащаются кислородом (рис. 6).

Развертка процесса детонации смеси пыли пшеницы с воздухом показана на рис. 7, а структура пылевой детонации, реконструированная с лазерного фотоснимка, — на рис. 8. Для более подробного анализа изменения параметров вещества во фронте детонации измерена температура (рис. 9) [17]. Температура за фронтом достигает максимума через 200—400 мкс. В смесях с 40% O₂ максимальная температура во фронте детонации находится в диапазоне 3000—3550 К, а в воздушных смесях — от 2400 до 2750 К. Доказано также, что излучение не проникает через ударную волну. Это следует из того факта, что после разрушения пылевых агломераций прохождение светового луча сильно ухудшается. Смесь в трубе толщиной 0,0635 м становится непрозрачной даже для ла-

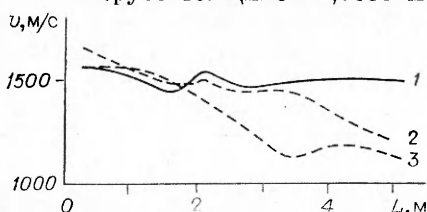


Рис. 5. Изменение скорости волны вдоль детонационной трубы в смеси пыли овса с воздухом. Иницирование с помощью предварительного взрыва смеси H₂/O₂.

Пыль дисперсностью $d < 75$ мкм и концентрацией, кг/м³: 1 — 0,27, 2 — 0,3, 3 — 0,235.

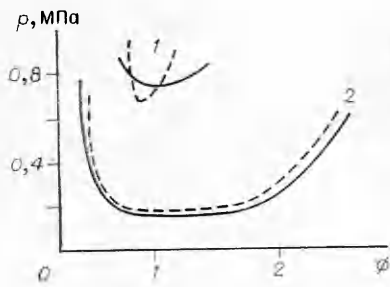


Рис. 6. Пределы детонации пыли овса [17].

1 — воздух; 2 — 40% O₂; сплошные линии — $75 < d < 106$ мкм, штриховые — $d < 75$ мкм.

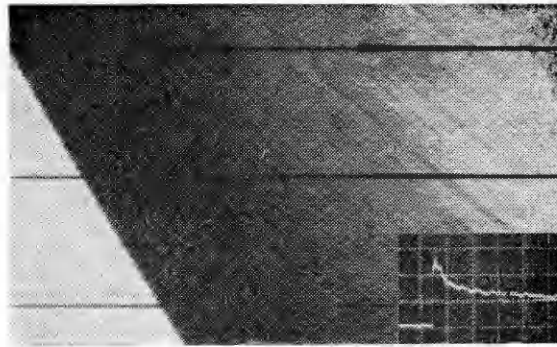


Рис. 7. Развертка детонации смеси овса с воздухом. В правом углу показано изменение давления. $v = 1525$ м/с.

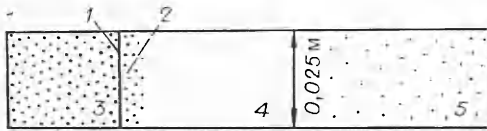


Рис. 8. Схема структуры пылевой детонации [6].

1 — фронт ударной волны; 2 — область разрушения агломератов; 3 — смесь; 4 — область горения; 5 — продукты горения.

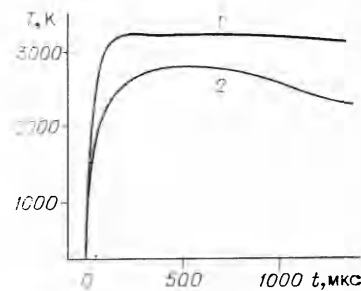


Рис. 9. Профили температур в детонационной волне.

1 — овес с воздухом, обогащенным кислородом (40% O₂), $d < 75$ мкм, $c = 0,3$ кг/м³, $v = 1600$ м/с; 2 — овес в воздухе, $d < 75$ мкм, $c = 0,256$ кг/м³, $v = 1430$ м/с.

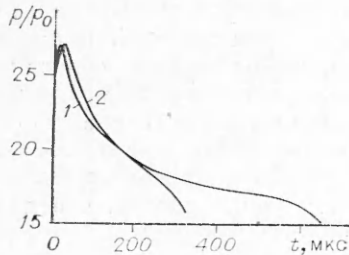


Рис. 10. Зависимость изменений давления в детонации смеси пыли пшеницы с воздухом [18].

1 — эксперимент; 2 — теория.

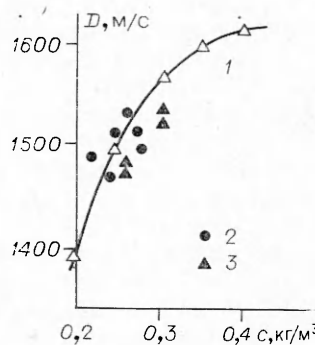


Рис. 11. Зависимость скорости детонации зерновой пыли от ее концентрации.

1 — теория; 2 — экспериментальные данные для пыли овса; 3 — то же для пыли пшеницы.

зерного излучения. Световые лучи могут проникать сквозь трубу лишь после частичного выгорания смеси. Из этих измерений однозначно следует, что излучение из зоны горения не может нагревать смесь перед фронтом детонационной волны, но зато может вызывать увеличение скорости реакции в зоне, где происходит воспламенение пыли за волной.

Численные расчеты структуры зоны детонации показывают, что непосредственно за ударной волной создается местная зона горючей сме-

си, обогащенная окислителем. Причина заключается в том, что газовое вещество практически сразу же ускоряется до скорости за волной, тогда как скорость частиц пыли возрастает постепенно. Происходит быстрый рост плотности газовой фазы и медленное увеличение концентрации частиц. Это происходит в зоне воспламенения и начальной фазы сгорания частиц, что создает благоприятные условия для воспламенения и горения пыли во фронте детонационной волны. Позднее скорость газа изменяется (в связи с тепловыделением) и скорости газовой и твердой фазы временно выравниваются, однако из-за инерции частиц и быстрого изменения скорости газовой фазы различия наблюдаются даже в плоскости Чепмена — Жуге.

Из проведенных численных расчетов следует, что потери из зоны, ограниченной ударной волной и плоскостью Чепмена — Жуге, в пылевоздушных смесях в трубе с сечением $0,0635 \times 0,0635$ м составляют приблизительно 5% тепловыделения в детонации [18]. Изменения давления в детонационной волне показано на рис. 10, а скорость детонации зерновых пылей — на рис. 11. Из проведенных расчетов следует, что примененная модель хорошо аппроксимирует результаты полученных измерений.

Заключение

Промышленные органические пыли можно довольно легко воспламенять с помощью ударных волн. Воспламенение некоторых пылей может происходить даже с числами Маха меньшими, чем необходимо для воспламенения горючих газовых смесей. Воспламенению в волне способствует большая пористость зерен (большая площадь нагрева), а также создание в начальный период ударной волны, которая вызывает дополнительное увеличение температуры в области воспламененной частицы. Ударные волны возникают в период, когда скорость частиц по отношению к скорости газа за волной является сверхзвуковой. Частица пыли ускоряется в результате существования аэродинамического сопротивления. Ее ускорение зависит, таким образом, от диаметра, коэффициента сопротивления и массы. В связи с тем, что создается местный прирост температуры в ударных волнах, рекомендуется, чтобы частица обладала большой массой и маленьким коэффициентом сопротивления (медленно ускорялась), с другой стороны, из-за скорости нагрева частица пыли должна обладать небольшой массой и большой площадью нагрева. Этот анализ приводит к существованию оптимальных размеров частиц пыли, которые легче всего воспламеняются. Опытным путем доказано, что для органических пылей оптимален диаметр частиц $50 \div 100$ мкм.

Легкость воспламенения органических пылей приводит к выводу, что смеси этих пылей могут детонировать в смесях с воздухом. Проведенные исследования показали, что легковоспламеняющиеся пыли детонируют даже в трубах с небольшим диаметром. Длина зоны реакции в детонационной волне больше, чем для газовых смесей, а время горения во фронте детонации меньше 1 мс. Из численных расчетов следует, что потери на стенки в случае детонации в довольно тонких трубах составляют около 5% полного тепла сгорания.

Факт появления детонации в наиболее трудновоспламеняемых пылевых смесях — в смеси угольной пыли с воздухом — приводит к выводу, что в соответствующих условиях большинство органических пылей может детонировать. Критический диаметр трубы, в которой может происходить детонационное горение пылевых смесей, значительно больше, чем для газов, и точно определить его очень сложно. Давление в детонационной волне в пылевоздушных смесях чаще всего укладывается в диапазоне 2—3 МПа, а после отражения волны от стенки может еще увеличиться в 2—3 раза. Такие большие давления не встречаются при дефлаграционном взрыве такого рода смесей. Однако для начала детона-

дионного горения должны одновременно быть выполнены многие условия: соответствующая концентрация и дисперсность, источник воспламенения, длинный канал со смесью и т. п., поэтому в промышленной практике такого рода горения встречаются довольно редко.

Поступила в редакцию 21/VI 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. M. A. Nettleton, R. Stirling. Proc. Roy. Soc. London, 1967, 300, 62.
2. M. A. Nettleton, R. Stirling. Comb. Flame, 1974, 22, 543.
3. C. W. Kauffman, P. Wolański e. a. Symposium on Grain Dust, U. S. Grain Marketing Research Laboratory, Manhattan, KS, 1979.
4. G. Breipohl, T. W. Lester, J. F. Marklin. Ibid.
5. C. W. Kauffman, P. Wolański, E. Ural e. a. Trzecia Miedzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych, Turawa, 1982.
6. P. W. Lański. First Specialists Meeting (Internat.) of the Combustion Institute. Bordeaux, 1981.
7. C. W. Kauffman, J. A. Nicholls. Dust Explosion Research at the University of Michigan. Fuel-air explosions. University of Waterloo Press, 1982.
8. E. Ural. Shock wave ignition of pulverized coal. Ph. D. Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, 1981.
9. A. E. Medvedev, A. V. Fiodorov e. a. Trzecia Miedzynarodowa Szkoła Wybuchowości Pyłów Przemysłowych. Turawa, 1982.
10. V. M. Boiko, A. N. Papyrin, M. Woliński e. a. The dynamics of scattering and ignition of a dust layer by a shock wave. The paper submitted for IX International Colloquium on Gasdynamics of Explosions and Reactive Systems, 1983.
11. W. P. Davis, A. D. Baer, N. W. Ryan. A study of the ignition of a Western Coal by a special shock tube technique. WSCI 83-9.
12. W. B. Cybulski. Bulletin de l'Academie Polonaise des Sciences, 1974, 21.
13. D. Rea. 14-th Symp. (Internat.) on Combustion. Pittsburgh, 1972.
14. W. Rartknech. Gas, vapor and dust explosions. International Symposium on Grain Elevator Explosions. National Academy of Sciences, Washington, DC, 1978.
15. M. A. Nettleton, R. Stirling. Comb. Flame, 1973, 21.
16. S. Wojcicki, M. Zalesiński. Recent Developments in Shock Tube Research, 1973.
17. A. Arisoy, P. Wolański, C. W. Kauffman e. a. Measurements on Agricultural dust detonations. Chemical and Physical Processes in Combustion. Atlantic City, 1982.
18. P. Wolański, D. Lee, C. W. Kauffman e. a. The structure of dust detonations. Ibid.

ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОДИФфуЗИОННОГО ПЛАМЕНИ ДЛЯ ШИРОКОГО ДИАПАЗОНА ЧИСЕЛ Le

В. Н. Виллюнов, И. Г. Дик, А. В. Зурер, А. Н. Ищенко
(Томск)

Классическая формула скорости распространения пламени [1]

$$u^2 = 2n! Le^{-n} \kappa [RT_+^2/E(T_+ - T_-)]^{n+1} k_0 \exp(-E/RT_+) \quad (1)$$

при формальном устремлении $Le = D/\kappa$ к нулю дает бесконечные значения для u . Причина такого дефекта — пренебрежение при выводе (1) конвективными составляющими потока тепла и вещества в зоне активных химических реакций. При достаточно малых коэффициентах диффузии D это неверно. Здесь u — скорость горения; n — порядок реакции; Le — число Льюиса; κ — коэффициент температуропроводности; R — газовая постоянная; E — энергия активации; k_0 — предэкспонент; T — температура; индекс $+$ соответствует параметрам продуктов реакции, а — параметрам исходной смеси.

В литературе специально рассматривался случай $D = 0$ и предложены соответствующие формулы для u [2—4]. В [2] выражение для u получено в приближении узкой зоны тепловыделения, где концентрация