

6. R. Marcellin. Ann. Phys., 1915, 3, 120.
7. В. И. Димитров, В. И. Быков, Г. С. Яблонский. IV Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву. М., 1974.
8. F. I. Krambeck. Arch. Rat. Mech. and Anal., 1970, 38, 5, 317.
9. Э. Камке. Справочник. М., «Наука», 1966.
10. I. I. Dahlquist. Bit, 1963, 3.
11. C. Treanor. Math. of Comput. 1966, 20, 5.
12. Н. С. Галюн, А. Н. Крайко. Изв. АН СССР, Механика и машиностроение, 1964, 6, 41.
13. В. И. Головичев, В. И. Димитров. ФГВ, 1972, 8, 1.
14. H. H. Rosenbrock. Comput. Journ., 1960, 3, 175.
15. H. J. D. Powell. J. Soc. Ind. Appl. Math., 1960, 8, 181.
16. R. Fletcher, M. J. D. Powell. Comput. Journ., 1963, 6, 163.
17. D. W. Marquardt. J. Soc. Ind. Appl. Math., 1963, 11, 431.
18. Э. Ф. Брин, В. В. Павлов. В сб. Математические проблемы химии. Ч. 1. Новосибирск, 1973.
19. Я. Б. Зельдович. ЖФХ, 1938, 11, 5.
20. H. D. Baehr, E. F. Schmidt. BWK, 16, 1.
21. H. R. Fehling. J. Inst. Fuel, 1948, 120.
22. В. Е. Алемасов, А. П. Тишин. Изв. вузов, Авиационная техника, 1958, 2.
23. В. И. Димитров, В. И. Головичев. Аэродинамические исследования, 1972, 2.
24. В. В. Налимов. Новые идеи в планировании эксперимента. М., «Наука», 1969.
25. В. В. Федоров. Теория оптимального эксперимента. М., «Наука», 1971.

УДК 614.841.12

ИЗУЧЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

I. СМЕСИ АММИАКА С ВОЗДУХОМ

В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев, Е. А. Кудрявцев, А. Н. Баратов

(Москва)

Пределы воспламенения измеряются в трубах или сосудах с малыми размерами [1—3]. Возможности применения таких данных для больших производственных помещений и неограниченных пространств не изучены. Наблюдения околопредельных явлений в большом объеме [4] и в небольшом сферическом сосуде [5] показали, что средняя степень выгорания определяется способностью пламени распространяться вниз. Конвективный подъем пламенного очага вверх не вызывает значительного выгорания смеси, если пламя затухает на потолке. При подъеме сферический пламенный очаг деформируется на ранней стадии [6] и затем приобретает форму сплюсненной по вертикальной оси сферы с провалом в основании [5, 7]. Такая форма пламени, наблюдающаяся при подъеме в свободном пространстве, сопровождается иной схемой газодинамического течения по сравнению с той формой, при которой происходило затухание в трубах [8], когда пламя охватывало все сечение трубы. Неясными остаются условия, при которых возможно появление распространяющегося вниз пламени и его затухание между потолком и дном сосуда.

В данной работе изучалось распространение пламени вверх и вниз в камере объемом восемь кубометров. Для упрощения интерпретации была выбрана камера с плоским потолком. Выбор аммиака в качестве горючего определялся тем, что в стандартных трубах для его смесей с воздухом наблюдается распространение пламени только вверх. Во всем диапазоне составов смесей при атмосферном давлении и комнатной температуре не удается осуществить распространение вниз [9]. Среди медленногорящих смесей имеется два типа [1, 2]: для пламен первого

типа возможно распространение пламени вверх, смеси второго типа ни при каких соотношениях не воспламеняются в стандартных трубах, но горят в более широких сосудах. По-видимому, возможен третий тип смесей, способных поддерживать распространение пламени лишь в достаточно больших объемах. К третьему типу могут принадлежать сильно разбавленные и ингибированные смеси. Предполагалось, что исследование воспламеняемости смесей аммиака с воздухом даст ответ на вопрос о способности трех типов смесей поддерживать распространение пламени вверх и вниз в больших объемах.

1. Исследование горения смесей аммиака с воздухом проводилось в камере-кубе из листовой стали объемом 8 м³. Процесс горения наблюдался визуально и фотографировался двумя кинокамерами на черно-белую и цветную пленку через большое боковое окно, смонтированное так, что верхний край его находился на уровне потолка. Окно было закрыто толстым органическим стеклом. После перемешивания смеси вентилятором проводился анализ на содержание аммиака методом кислотно-основного титрования с точностью $\pm 0,1\%$. В одной из боковых стенок камеры на расстоянии 155 см от потолка имелось отверстие диаметром 50 см, которое закрывалось тонкой лавсановой пленкой. Перед зажиганием пленка надрезалась.

Зажигание осуществлялось тремя способами:

а) пережигаемой напряжением 200 В постоянного тока медной провололочкой диаметром 0,07 мм в центре и в точке, отстоящей на 20 см от потолка и расположенной на вертикальной оси, проходящей через центр;

б) индукционной искрой в центре; искра формировалась высоковольтным индуктором типа ИВ-100; при напряжении на первичной обмотке 50 В переменного тока и искровом промежутке 10 мм индуктор включался до трех раз; длительность одного включения составляла 2—3 с;

в) пламенным очагом, вылетающим из цилиндрического сосуда диаметром 20 см и объемом 10 л; сосуд, содержащий стехиометрическую смесь аммиака с воздухом, устанавливался на подставке на полу камеры; верхний край его находился в поле зрения и отстоял от потолка на расстоянии 130 см; смесь в сосуде зажигалась пережигаемой провололочкой после удаления крышки.

Применялся жидкий аммиак чистотой 99,96%. Опыты проводились при атмосферном давлении и температуре ~ 298 К.

2. Развитие процесса горения в камере происходило так же, как в небольших сферических сосудах [5, 7], когда исследовались медленно-горящие смеси. Возникший от искры пламенный очаг, увеличиваясь в размерах, поднимался до потолка, растекался по нему, после чего пламя распространялось вниз. Такое распространение пламени имело место и в опытах со смесями околопредельного состава в большой сфере [4]. Кинокадры конвективного подъема пламенного очага в смеси, содержащей 26,6% NH_3 в воздухе, приведены на рис. 1. Сферический на ранней стадии очаг затем деформировался: сплющивался по вертикальной

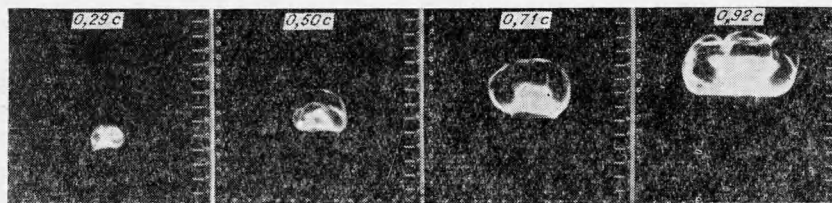


Рис. 1. Конвективный подъем пламенного очага в смеси, содержащей 26,6% NH_3 в воздухе. Зажигание в центре пережигаемой провололочкой, расстояние между соседними метками равно 10 см.

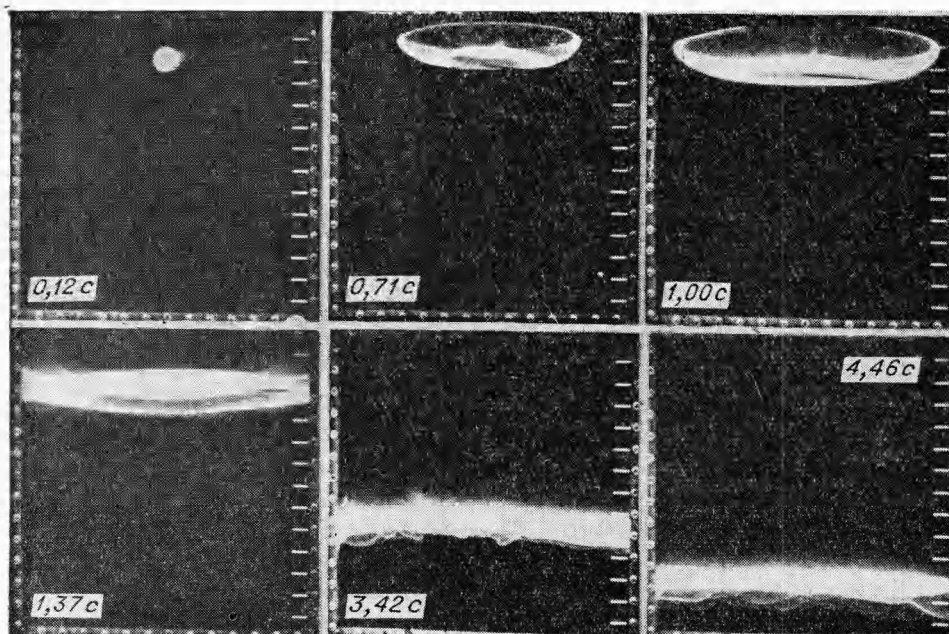


Рис. 2. Распространение пламени в смеси, зажигание под потолком пережигаемой проволокой.

оси; в основании его появлялся провал. По мере подъема форма провала изменялась от конической до цилиндрической. Растекание пламени по потолку и его последующее распространение вниз в смеси, содержащей 21,1% NH_3 в воздухе, показано на рис. 2. Видно, что при распространении вниз фронт пламени представлял собой почти плоскую сплошную поверхность с отогнутыми вниз краями. Для смеси этого состава в нижней половине камеры фронт приобретал мелкоячеистую структуру. Средний диаметр ячейки составлял ~ 5 см. В смесях, близких к бедному пределу, пламенные очаги при их подъеме вверх не имели четких границ.

Результаты измерений пределов воспламенения аммиака в смеси с воздухом представлены в виде схемы на рис. 3. В опытах в камере за критерии принималось распространение пламени до потолка и до дна. Значения бедных и богатых пределов, найденные таким образом, равны:

По распространению вверх	15,8 и 28,0% NH_3 (центральное зажигание)
По распространению вниз	17,4 и 28,0% NH_3 (центральное зажигание)
	18,6 и 27,7% (зажигание под потолком)

Источником зажигания смесей в этих опытах являлась пережигаемая проволока. Когда вместо пережигаемой проволоки использовалась индукционная искра, изменений в пределах по распространению вверх обнаружено не было. На рис. 3 штрихом обозначены бедный и

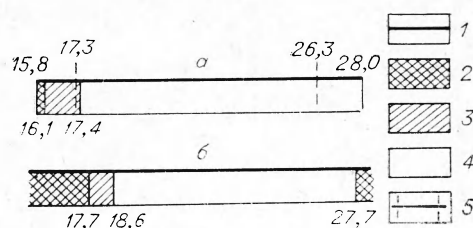


Рис. 3. Результаты измерений пределов воспламенения аммиака в смеси с воздухом при зажигании точечными источниками в центре (а) и под потолком (б). 1 — распространение пламени до потолка; 2 — гашение пламени на потолке; 3 — частичное распространение пламени вниз; 4 — распространение пламени до дна; 5 — пределы в стандартной трубе (распространение вверх).

богатый пределы воспламенения, измеренные в стандартной трубе при зажигании индукционной искрой. Эти пределы равны 17,3 и 26,3% NH_3 в воздухе. В смесях, беднее 15,8 и богаче 28,0% NH_3 , возникший от искры пламенный очаг затухал в камере на некотором расстоянии от электродов. При этом расстояние подъема и размеры пламенного очага уменьшались по мере удаления от предельных смесей. Опыты в камере показали, что со стороны бедного предела существуют широкие области затухания пламени на потолке и частичного распространения вниз. При частичном распространении вниз видимая скорость пламени по мере удаления фронта от потолка уменьшалась почти до нулевой. На светящейся поверхности пламени иногда наблюдались темные пятна; свечение исчезало от боковых стенок камеры к середине.

При зажигании под потолком измерялись видимые скорости плоского пламени при его распространении вниз. Полученные данные представлены на рис. 4. Видно, что для всех исследованных смесей пламя движется с замедлением. Распространение пламени с примерно постоянной скоростью происходило лишь на начальном участке. На рис. 5 нанесены видимая скорость на этом участке (u_b) и скорость пламени, отнесенная к свежей смеси (u_0). Последняя вычислена по формуле: $u_0 = u_b (T_0/T_b)$, где T_0 — температура свежей смеси; T_b — термодинамическая температура горения. Темп изменения видимой скорости со стороны бедного и богатого пределов, согласно рис. 5, различен, а максимальное значение u_b сдвинуто вправо.

Смеси, которые не воспламенялись от точечных источников, зажигались пламенным очагом, полученным с помощью 10-литрового сосуда. Вылетающий из сосуда очаг, увеличиваясь в размерах, поднимался до потолка при содержании 14,2% NH_3 со стороны бедного и при 29,1% NH_3 со стороны богатого пределов. Пламя имело при этом грибообразную форму. Последующее распространение вниз наблюдалось со стороны бедного предела на 30 см от потолка при 15,3% NH_3 и со стороны богатого — до дна при 28,3% NH_3 . На рис. 6 показано горение смеси, содержащей 28,3% NH_3 , зажженной таким пламенным очагом. При испытаниях в воздухе пламенный очаг затухал на расстоянии 30—40 см от верхнего края сосуда.

3. Пределы по распространению пламени вверх в камере объемом 8 м³ шире, чем в стандартной трубе при одном и том же источнике зажигания (см. рис. 3). В камере пламя распространялось вниз в широком диапазоне концентраций, тогда как в трубах диаметром до 7,5 см

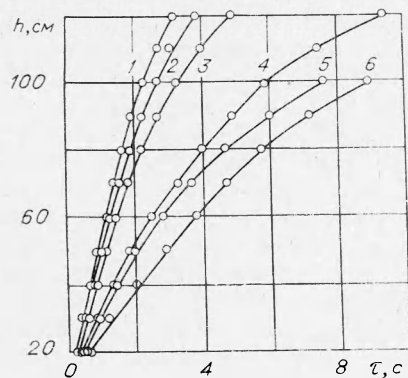


Рис. 4. Распространение пламени вниз. Зависимость расстояния от потолка (h) от времени (τ) для смесей с различным содержанием NH_3 в воздухе (%):

1 — 21,1; 2 — 24,2; 3 — 27,6; 4 — 18,3; 5 — 18,5; 6 — 27,9.

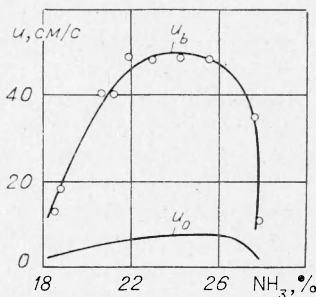


Рис. 5. Распространение пламени вниз в смесях NH_3 +воздух.

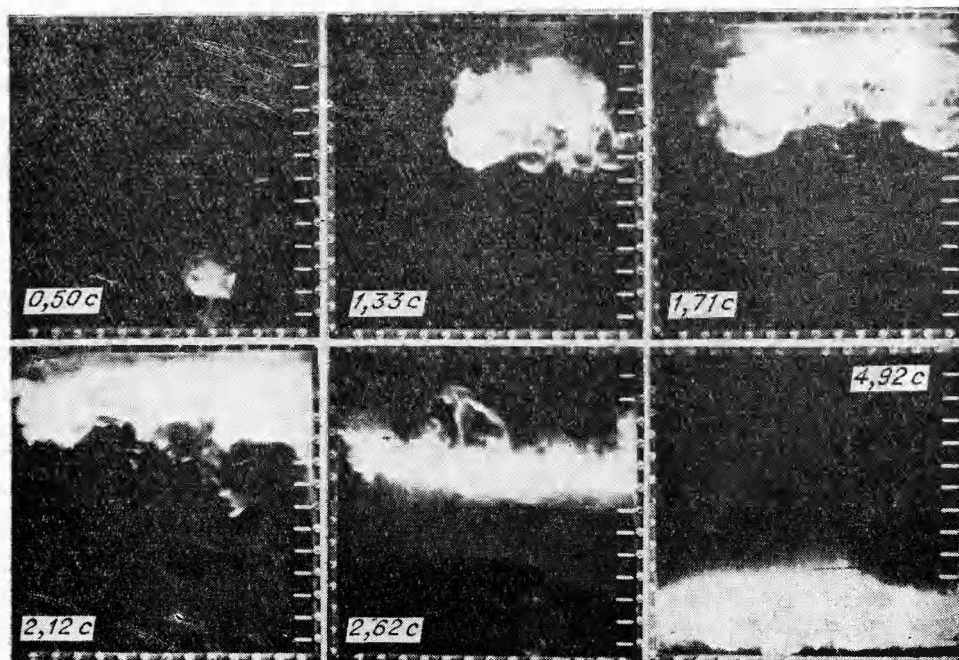


Рис. 6. Распространение пламени в смеси, содержащей 28,3% NH_3 в воздухе. Зажигание пламенным очагом, получаемым с помощью 10-литрового сосуда.

никакие смеси аммиака с воздухом не способны поддерживать распространение вниз [9].

Более широкими являются пределы при зажигании пламенным очагом из 10-литрового сосуда, заполненного стехиометрической смесью. Видно (см. рис. 6), что при подъеме вверх и последующем распространении вниз пламя оставалось турбулентным. Видимая скорость турбулентного пламени для смеси с 28,3% NH_3 была больше максимальной видимой скорости ламинарного пламени (см. рис. 5). Данные по влиянию слабой турбулентности на пределы воспламенения приведены в [1, 10, 11]. В [1] сообщалось о расширении бедного предела метана в воздухе при перемешивании смеси вентилятором в небольшом сферическом сосуде. Действие потока на пределы пропано-воздушных смесей в горизонтальных трубах исследовалось в [10, 11]. Согласно [11], при скоростях потока ~ 50 см/с расширялись оба предела, а при четырехкратном увеличении скорости пределы вновь сужались. В [10] при более высоких значениях скорости потока бедный предел расширялся, а богатый сужался.

Возникновение турбулентного горения запределной смеси (см. рис. 6) обусловлено увеличением мощности и изменением характера зажигания. Необходимость изучения схем зажигания, вызывающих отклонения при измерении пределов воспламенения по сравнению со стандартным методом, отмечалась в [12]. В рассматриваемом примере (см. рис. 6) объем смеси, из которой создается зажигающий пламенный очаг, превышает в несколько раз полный объем стандартной трубы. Для очага с заданным объемом будут существовать оптимальные условия зажигания смесей, находящихся по стандартной классификации вне пределов воспламенения. Это означает, что доказано существование смесей третьего типа, которые способны гореть только в достаточно больших объемах.

Измерение пределов воспламенения бедных метано-воздушных смесей в трубах диаметром 5,1 (5,3 CH_4) и 9,5 см (5,6% CH_4) показало,

что затухание происходило при скоростях конвективного подъема пузырей горячих продуктов сгорания 23,5 и 33,1 см/с [8]. Такое соотношение скоростей соответствовало формуле $0,328 (gD)^{1/2}$, где g — гравитационное ускорение, D — диаметр трубы. Удовлетворительное соответствие наблюдалось и для бедных пропано-воздушных смесей. Было предположено [8], что затухание пламени в трубах наступает при равенстве скорости подъема пузыря и видимой скорости пламени. Затухание в более широком канале сечением 30×30 см наблюдалось в [13]. В смеси, содержащей 5,5% метана в воздухе, пламя, достигнув стенок, затем разрушалось после подъема на 60 см. Измерения пределов воспламенения пропано-воздушных смесей, ингибированных бромистым водородом, показало, что предел по распространению вверх в трубе диаметром 7 см реализуется при одинаковых скоростях пламени для всех исходных смесей с конечными температурами 1700—2200 К [14]. Авторы [14] считают, что их результаты поддерживают идею о конвективном затухании пламени в трубах при распространении вверх. Опыты [8] и [13] трудно сопоставимы, а систематическое изучение затухания пламени в трубах с диаметром более 9,5 см не проводилось. Если бы механизм затухания, рассмотренный в [8], осуществлялся и в трубах с большим диаметром, то пределы по распространению вверх для смесей аммиака с воздухом сошлись бы при $D \approx 25$ см (из рис. 5 u_b принята равной 50 см/с). В трубах с $D > 25$ см никакие смеси не были бы способны поддерживать распространение пламени вверх при атмосферном давлении и комнатной температуре. В большой камере (см. рис. 3) пламя поднималось до потолка в тех смесях, в которых оно затухало в стандартной трубе. Горизонтальный диаметр очага на последней фотографии рис. 1 равен 80 см. При распространении пламени вверх в помещениях больших размеров, когда пламя находится вдали от стенок, его форма отличается от формы пламени в трубах, где оно похоже на параболоид вращения. Форма очага пламени на рис. 1 является замкнутой и состоит из внешней поверхности и поверхности провала в основании. Возможно, что замкнутость пламени обеспечивает его повышенную устойчивость по сравнению с разомкнутой поверхностью, обрывающейся вблизи стенок трубы.

Остается не исследованным вопрос о возможности затухания пламени в объеме большой камеры при подъеме его вверх вдали от стенок. В смесях вне области воспламенения, которая расположена от 15,8 до 28,0% NH_3 , возникший от искры пламенный очаг затухал после подъема вверх на 20—40 см. В этих случаях могло происходить затухание очага, в котором фронт пламени полностью не сформировался вследствие слабости источника зажигания. По этой причине могло затухать пламя в смеси с 30,0% NH_3 при зажигании пламенным очагом из 10-литрового сосуда. В этом случае свечение продолжалось при подъеме очага на 100 см.

Не исследованы условия, при которых происходит затухание плоского пламени при его распространении от потолка вниз. Предположительная схема затухания в небольших по диаметру длинных трубах рассматривается в [5]. При распространении пламени вниз вследствие большой поверхности контакта со стенкой и за счет конвективного теплообмена осуществляется интенсивное охлаждение продуктов сгорания над фронтом пламени. Конвективное гашение горения летучих взрывчатых веществ в поле массовых сил рассмотрено в [15, 16]. В этих работах фронт пламени расположен над плоской поверхностью взрывчатого вещества, а вектор ускорения g направлен от фронта пламени к поверхности. В сосудах с достаточно большими поперечными размерами на возникновение плоского пламени и на его распространение вниз на ранней стадии боковые стенки не могут оказывать существенного влияния. Действие свободной конвекции может проявиться только за

счет теплообмена продуктов сгорания с потолком. В таких случаях появляется ячеистая структура с восходящими от фронта и нисходящими от потолка потоками. При значительных поперечных размерах возникает проблема пределов воспламенения в практически неограниченных облаках, которая обсуждается в обзоре [17]. Большие производственные помещения по условиям горения в них околопредельных газовых смесей, по-видимому, целесообразно отнести к неограниченным облакам [17]. Данные рис. 4 свидетельствуют о том, что влияние свободной конвекции начинает проявляться сразу после начала движения плоского фронта вниз. Это влияние более заметно в медленногорящих смесях. Тормозящее действие конвекции возрастает по мере удаления фронта пламени от потолка. Измерение пределов распространения пламени вниз при атмосферном давлении может проводиться только в объемах с достаточно большими размерами в горизонтальных направлениях. Необходимо изучение многообразия схем зажигания под потолком для установления границ распространения пламени вниз [12].

Из результатов, представленных на рис. 3, следует, что у аммиака со стороны бедного предела существует широкая переходная область — область концентраций между распространением пламени вверх и вниз. Со стороны богатого предела такой области не обнаружено. Установлено, что отнесение источника зажигания от потолка в центр изменяет бедный предел по распространению вниз. При центральном зажигании к потолку подходит пламенный очаг больших размеров, который обеспечивает распространение пламени вниз в более бедных смесях [4, 5]. Термодинамические температуры горения (T_b) предельных смесей по распространению вниз при центральном зажигании, т. е. смесей, содержащих 17,4 и 28,0% NH_3 , примерно равны и составляют 1830 К. На бедном пределе по распространению пламени вверх (15,8% NH_3) $T_b = 1680$ К.

Проблема устойчивости ламинарных пламен рассмотрена в [18]. Данные рис. 4 свидетельствуют о том, что плоское ламинарное пламя смесей аммиака с воздухом распространяется вниз со скоростями $u_0 < 1$ см/с при отсутствии каких-либо стабилизирующих устройств. Медленное распространение плоских пламен вверх неосуществимо, так же как и стабилизация таких пламен на бунзеновской горелке. Пламена смесей аммиака с воздухом при комнатной температуре и атмосферном давлении не способны поддерживаться на горелке ни при каких соотношениях. Стабилизировать такие пламена удается только при обогащении воздуха кислородом, т. е. за счет увеличения скорости пламени u_0 . Из сопоставления этих двух случаев видно, что свободная конвекция в одном из них обеспечивает стабилизацию плоского фронта и в другом приводит к всплыванию и последующему затуханию пламени. Если существует явление неустойчивости ламинарного плоского пламени, то оно существенным образом связано с влиянием свободной конвекции. Теоретический анализ устойчивости ламинарного плоского пламени и сравнение его с опытом следует проводить с учетом уравнений Навье — Стокса и соответствующих граничных условий.

Поступила в редакцию
10/XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, G. W. Jones. Limits of Flammability of Gases and Vapors. U. S. Bureau of Mines Bull. 503, Washington, U. S. Government Printing Office, 1952.
2. M. G. Zabetakis. Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors. U. S. Bureau of Mines Bull. 627, Washington, U. S. Government Printing Office, 1965.

3. L. A. Lovachev, V. S. Babkin a. o. Combustion and Flame, 1973, 20, 259.
4. A. L. Furno, E. B. Cook a. o. Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1971, p. 593.
5. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн. В сб. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 289.
6. G. E. Andrews, D. Bradley. Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1973, p. 1119.
7. O. C. de C. Ellis. Fuel. 1928, 7, 195, 245.
8. A. Levy. Proc. Roy. Soc. (London), 1965, A283, 134.
9. A. G. White. J. Chem. Soc., 1922, 121, 1688.
10. E. S. Starkman, L. P. Haxby, A. G. Cattaneo. Fourth Symposium (International) on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore, 1953, p. 670.
11. K. N. Palmer, P. S. Tonkin. J. Appl. Chem., 1961, 11, 5.
12. L. A. Lovachev. Combustion and Flame, 1971, 17, 275.
13. H. F. Coward, F. Brinsley. J. Chem. Soc., 1914, 105, 1859.
14. R. F. Simmons, N. Wright. Combustion and Flame, 1972, 18, 203.
15. В. С. Бабкин, С. С. Хлевной. ФГВ, 1972, 8, 597.
16. Э. А. Штессель, А. Г. Мержанов и др. ФГВ, 1973, 9, 855.
17. R. A. Strehlow. Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1973, p. 413.
18. Nonsteady Flame Propagation. Ed. by G. H. Markstein, Pergamon Press, Oxford, 1964.

УДК 534.222.2

О ЗАДЕРЖКЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВО ФРОНТЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ (газ—пленка) ДЕТОНАЦИИ

С. А. Лесняк, М. А. Назаров, А. И. Сербинов, Я. К. Трошин

(Москва)

Термин «гетерогенная детонация» будем относить к детонационным процессам в трубах, заполненных газообразным окислителем, на стенки которых нанесена пленка жидкого горючего с крайне низкой упругостью пара. Промышленным прообразом таких гетерогенных систем являются магистрали воздушных поршневых компрессоров: пары масла, используемого для смазки поршня компрессора, уносятся потоком воздуха и конденсируются на стенках магистрали. При выполнении определенных условий (достаточно толстый слой горючего на стенках, мощный инициатор) в таких системах возможно распространение детонационной волны [1—4]. Исследование процесса показало, что детонационный фронт состоит из ударного скачка и зоны химической реакции в виде обратного конуса, начинающейся на некотором расстоянии от ударного фронта и смыкающейся на расстоянии 4—7 калибров трубы [1, 3, 4]. Если во фронте гомогенной газовой детонации задержки воспламенения крайне малы, то расстояния между зоной реакции и ударным скачком при гетерогенной детонации составляют величину порядка одного сантиметра [1, 5, 6]. Физически ясно, что тепловыделению во фронте гетерогенной детонации предшествует процесс испарения и смесеобразования, поскольку концентрация паров горючего при начальных условиях, как в проводимых экспериментах, так и в условиях промышленных установок, крайне низка и лежит далеко от пределов горения. Соответственно расстояние между ударным фронтом и передней границей зоны горения включает в себя и время смесеобразования, и период индукции химической реакции. В данной работе проведен анализ влияния процессов тепломассообмена и химической кинетики на величину задержки воспламенения во фронте гетерогенной детонации.

Опыты проводились в ударных трубах квадратного сечения 2×2 и 1×1 см². Труба заполнялась кислородом при атмосферном давлении.