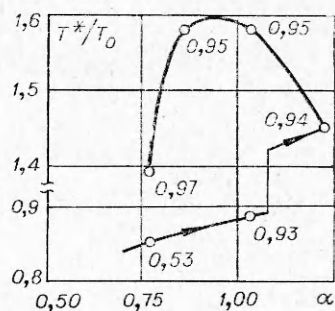


Рис. 7. Результаты измерений температуры в зоне рециркуляции (гистерезис по  $\alpha$ ).



ранию. При некотором значении  $\alpha$  (вблизи  $\alpha=1$ ) температура, фиксируемая термпарой в зоне рециркуляции, скачком возрастала на  $500 \div 600^\circ$  и при дальнейших изменениях  $\alpha$  как в сторону возрастания, так и в сторону уменьшения, оставалась на высоком уровне. Зависимость  $T$  от  $\alpha$  на рис. 7 получена путем совмещения непрерывной записи температуры с дискретными значениями  $\alpha$ . На этой зависимости отмечены значения полноты сгорания, определенные по замерам давления в камере сгорания.

Проведенные эксперименты подтверждают, что в определенном диапазоне значений  $T_c$  и  $\alpha$  возможно существование двух термических режимов в рециркуляционных зонах, реализация которых зависит от предыстории процесса. Обычно измеряемые параметры камер сгорания (расходы и температуры компонентов, давление, полнота сгорания) не позволяют при достаточной длине камеры сгорания определить характер термического режима в рециркуляционной зоне, оказывающего существенное влияние на динамические свойства рабочего процесса.

Поступила в редакцию 9/X 1976,  
после доработки — 22/XI 1977

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович. ЖТФ, 1941, XI.
2. Л. А. Вулис. Тепловой режим горения. М.—Л., ГЭИ, 1954.
3. А. Д. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М., «Наука», 1967.
4. Л. А. Клячко, А. В. Кудрявцев. ПМТФ, 1963, 6.
5. Б. В. Раушенбах, С. А. Белый и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. М., «Машиностроение», 1964.

## ИЗУЧЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ В БОЛЬШИХ ОБЪЕМАХ. II. СМЕСИ ПРОПАНА С ВОЗДУХОМ

В. Н. Кривулин, Е. А. Кудрявцев, А. Н. Баратов,  
И. С. Глухов, В. Л. Павлова

(Москва)

Известно [1, 2], что существуют горючие газовые смеси, пламя по которым неспособно распространяться в стандартной трубе. При воспламенении таких смесей в больших объемах [2] возможно их частичное или полное выгорание. Факторы, влияющие на пределы воспламенения и степень выгорания при распространении пламени в околопредельных смесях, рассмотрены в [1—5]. Некоторые из них до сих пор малоизучены. Возникновение турбулентного горения, вызванное ис-

точником зажигания и конвекцией, привело к расширению пределов аммиака в воздухе при распространении пламени как вверх, так и вниз [2]. Влияние турбулентности на пределы воспламенения изучалось в трубах [6—8] и других малоразмерных сосудах [9]. Опыты с турбулизированными околопредельными смесями в больших объемах авторам неизвестны.

В данной работе продолжено изучение пределов воспламенения невозмущенных и непрерывно перемешиваемых смесей. Камера-куб объемом 8 м<sup>3</sup>, описанная в [2], считалась достаточно герметичной, если при остаточном давлении 700 мм рт. ст. оно в течение 30 мин не повышалось более чем на 1 мм рт. ст. Жидкий пропан чистотой 99,65% отмерялся по весу в баллон объемом 3 л и подавался в камеру, из которой с помощью вакуумного насоса ВН-1М была удалена часть воздуха. Взвешивание проводилось на настольных циферблатных весах ВНЦ-10 с точностью ±5 г. Смеси перемешивались осевым вентилятором с регулируемым числом оборотов, диаметр лопастей которого составлял 25 см. Вентилятор устанавливался на две камеры у одной из боковых стенок так, что ось вращения его проходила примерно через центр сосуда. Измерялась максимальная скорость закрученного потока в районе электродов с помощью ручного чашечного анемометра типа «А» (ГОСТ 6376-52). Однородность смеси контролировалась с помощью хроматографа «Цвет-104». Пробы на анализ отбирались из центральной части камеры. Смесь считалась приготовленной, когда разница между заданной объемной концентрацией пропана и измеренной с помощью хроматографа не превышала 0,15%; относительная погрешность на бедном и богатом пределах соответственно составляла ~7,5 и 1,5%.

Смеси зажигались искрой, получаемой при пережигании медной проволоочки диаметром 0,07 и длиной 15 мм переменным током напряжением 220 В. Источник зажигания находился на вертикальной оси и отстоял на расстоянии 80 см от потолка.

Процесс распространения пламени наблюдался визуально и снимался двумя кинокамерами «Красноярск-2» со скоростью 24 кадр/с на черно-белую негативную киноплёнку марки КН-3 и цветную обрабатываемую киноплёнку марки ЦО-32Д. Опыты проводились при атмосферном давлении и температуре ~290 К.

**Невозмущенные смеси.** Процесс распространения пламени в невозмущенных смесях протекал по схеме, характерной для ограниченных объемов: подъем пламенного очага до потолка — растекание его по потолку — последующее распространение вниз. При этом наблюдалось затухание пламени при распространении вверх, при растекании по потолку или при распространении вниз.

Результаты измерений пределов представлены на рис. 1. Значения бедных и богатых пределов в камере составили: по распространению вверх — 2,05 и 9,9% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; по распространению вниз — 2,2 и 7,3% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. За критерии при определении пределов принималось соответственно

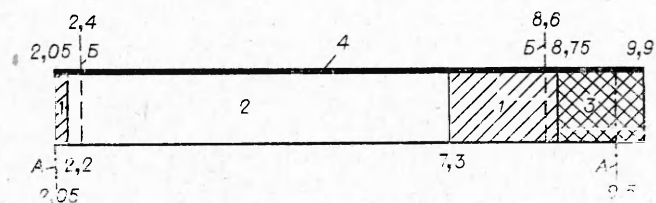


Рис. 1. Результаты измерений пределов распределения пламени в смеси пропана с воздухом.

1 — частичное распространение вниз; 2 — распространение до дна; 3 — гашение на потолке; 4 — распространение пламени до потолка. А — пределы в непрерывно перемешиваемых смесях; В — пределы воспламенения в стандартной трубе.

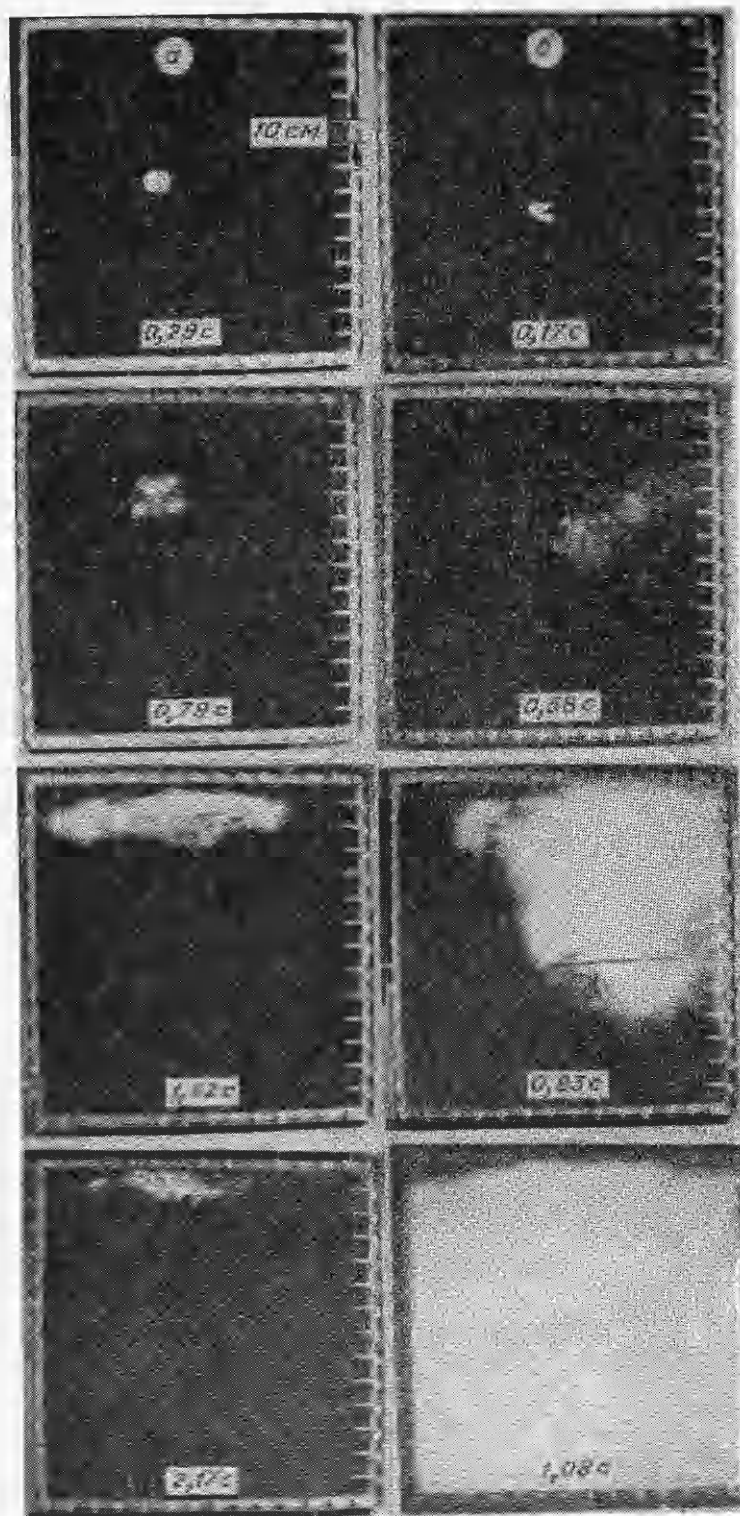


Рис. 2. Распространение пламени в смеси, содержащей 9,3%  $C_3H_3$  в воздухе.  
а) невозмущенная смесь; б) непрерывно перемешиваемая смесь.

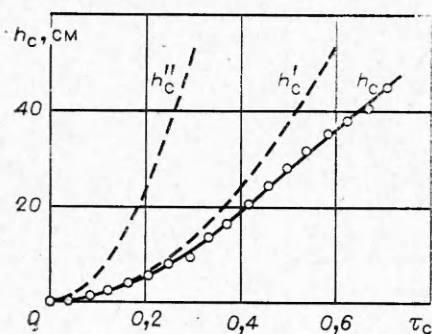


Рис. 3. Зависимость перемещения во времени центра тяжести пламенного очага:  
 $h'_c$  — расчет [17],  $h''_c$  — расчет [4].

распространение пламени до потолка и до дна камеры. На рис. 1 штриховыми линиями обозначены пределы воспламенения, измеренные в трубе диаметром 5,8 и длиной 150 см. Смесь для испытаний в трубе отбиралась из камеры и поджигалась пережигаемой проволочкой и индукционной искрой [10] у открытого нижнего конца трубы. Пределы в трубе не зависели от типа использованных источников зажигания и составили: бедный — 2,4%, богатый — 8,6%  $C_3H_8$ .

При горении околопредельных пропано-воздушных смесей в камере пламя распространялось вверх в виде деформированной сферы, а вниз — плоским фронтом. Края фронта пламени при этом были четко обозначены. Фотографии таких пламен приведены в [2]. Исключение составили смеси, содержащие пропан в диапазоне концентраций  $\sim 8,0 \div 9,9\%$ , пламя в которых распространялось вверх в виде облачка с размытыми границами. На рис. 2, а представлены фотографии распространения такого пламени вверх с последующим затуханием его на потоке в смеси, содержащей 9,3%  $C_3H_8$ .

После распространения пламени вниз в богатых по пропану смесях на оргстекле, которым было закрыто смотровое окно, наблюдался слабый равномерный налет сажи. Цвет пламени со стороны бедного предела был бледно-голубой, а со стороны богатого предела — желто-красный.

В смеси, содержащей 2,3%  $C_3H_8$  в воздухе, из последовательных фотографий пламен получена зависимость высоты подъема центра тяжести пламенного очага  $h_c$  от времени  $\tau$  (рис. 3).

**Непрерывно перемешиваемые смеси.** Эта серия опытов проводилась при скоростях потоков в районе электродов, равных  $\omega \approx 1,0$  и 2,7 м/с. Значения  $\omega$  выбраны, исходя из максимально возможных скоростей потоков, образующихся при вентиляции помещений [11]. Процесс распространения пламени в непрерывно перемешиваемых смесях протекал по той же схеме, что и в невозмущенных смесях. Направление действия вынужденной конвекции при этом отличалось от направления действия свободной конвекции примерно на  $50^\circ$ . На рис. 2, б приведены кинокадры распространения пламени в смеси, содержащей 9,3%  $C_3H_8$ , при  $\omega = 2,7$  м/с. Видно, что скорость горения в непрерывно перемешиваемой смеси значительно больше, чем в невозмущенной. Факт увеличения скорости, а также характер распространения фронта пламени дают основание полагать, что горение было турбулентным. В непрерывных перемешиваемых смесях пламя либо затухало у электродов, либо распространялось до потолка, а затем до дна камеры; гашения пламени на потолке или частичного распространения вниз не наблюдалось. Пределы по распространению пламени вверх и вниз были одинаковы и при  $\omega = 1,0$  и 2,7 м/с составили: бедный — 2,05%, богатый — 9,5%  $C_3H_8$ .

Пределы в невозмущенных смесях по распространению пламени вверх в камере объемом 8 м<sup>3</sup> шире, чем в стандартной трубе при одинаковых условиях проведения эксперимента (см. рис. 1). Пределы по распространению вниз также шире, чем в трубах [1]. Эти результаты

согласуются с полученными ранее [2] в опытах с аммиачно-воздушными смесями.

Пределы в непрерывно перемешиваемых смесях шире пределов по распространению пламени вниз и уже пределов по распространению пламени вверх в невозмущенных смесях. Как видно из рис. 1, бедный предел при турбулизации смеси практически не изменяется, богатый же изменяется существенно. Расширение пределов по распространению пламени вниз может быть связано с увеличением скорости горения при турбулизации смеси [12]; сужение богатого предела по распространению пламени вверх — с недостаточной для данных скоростей потока мощностью источника зажигания [13].

Из рис. 1 видно, что в камере объемом 8 м<sup>3</sup> невозмущенные пропано-воздушные смеси имеют широкую переходную область между распространением пламени вверх и вниз со стороны богатого предела и узкую — со стороны бедного предела. Исследования в большой сфере [14] и небольшом сферическом сосуде [15] показали, что средняя степень выгорания (или степень повышения давления) невелика, если пламя затухает на потолке, и резко возрастает при распространении вниз. В опытах в камере объемом 8 м<sup>3</sup> пламя затухало на потолке в диапазоне концентраций 8,75 ÷ 9,9% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> в воздухе. Расчет показывает, что в возмущенной смеси, содержащей 9,3% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> (см. рис. 2, а), выгорает ~ 0,4% смеси; повышение давления при этом в закрытой камере составило бы ~ 1,5 кПа. При расчете использовалась адиабатическая температура пламени 1450 К [16]. Максимальный объем пламенного очага принимался равным ~ 160 л (см. рис. 2, а, кадр 3). При непрерывном перемешивании та же смесь сгорает во всем объеме камеры (см. рис. 2, б). Повышение давления в этом случае было бы существенным (~ 390 кПа). Таким образом, показано, что степень опасности переходной области зависит от состояния смеси. В последнее время в ряде работ [3, 4, 15] обсуждается критерий при определении предела: способность пламени распространяться вверх. Очевидно, решение вопроса о критерии окажется возможным после изучения степени опасности переходной области для всего многообразия встречающихся условий.

Закономерности подъема пламенных очагов изучались в [4, 17]. Из законов движения твердого тела получены выражения для скорости конвективного подъема центра тяжести пламенной сферы. На рис. 3 штриховыми линиями обозначены теоретические зависимости  $h'_c(\tau)$  и  $h''_c(\tau)$ , вычисленные по формулам  $h'_c = g\tau^2 \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_c}\right) / 8 \left(\frac{1}{2} + \frac{\rho_b}{\rho_0}\right)$  [17] и  $h''_c = g\tau^2 \left(\frac{\rho_0}{\rho_b} - 1\right) / 8$  [4], где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\rho_0$  — плотность свежей смеси;  $\rho_b$  — плотность продуктов сгорания при адиабатической температуре пламени, равной 1620 К [16]. Видно, что в смеси, содержащей 2,3% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> в воздухе, центр тяжести пламенного очага поднимается вначале ( $\tau < 0,35$  с) с ускорением, затем его движение становится равномерным. Эксперимент в камере и теория [17] хорошо согласуются для  $\tau < 0,2$  с. Существенное отличие кривых  $h'_c(\tau)$  и  $h_c(\tau)$  обусловлено, очевидно, пренебрежением силой сопротивления в [4] при нахождении выражения для скорости подъема пламенной сферы.

Авторы выражают благодарность В. С. Бабкину за обсуждение работы в ходе ее выполнения.

Поступила в редакцию 13/1 1977,  
после доработки — 14/II 1978

## ЛИТЕРАТУРА

1. H. F. Coward, G. W. Jones. U. S. Bureau of Mines Bull. 503, Washington, U. S. Government Printing Office, 1952.
2. В. Н. Кривулин, Л. А. Ловачев и др. ФГВ, 1975, **11**, 890.
3. L. A. Lovachev, V. S. Babkin a. o. Combustion and Flame, 1973, **20**, 259.
4. G. E. Andrews, D. Bradley. Fourteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1973, p. 1119.
5. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн. ФГВ, 1976, **12**, 222.
6. E. S. Starkman, L. P. Haxby, A. G. Cattaneo. Fourth Symposium (International) on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore, 1953, p. 670.
7. K. N. Palmer, P. S. Tonkin. J. Appl. Chem., 1961, **11**, 5.
8. S. Crescitelli, F. Napolitano a. o. Riv. Combust., 1974, **28**, 210.
9. R. V. Wheeler. J. Chem. Soc., 1919, **115**, 81.
10. В. Т. Монахов. Методы исследования пожарной опасности веществ. М., «Химия», 1972.
11. Указания по определению категории производств по взрывной, взрывопожарной и пожарной опасности СН 463-74. М., Стройиздат, 1975.
12. А. С. Соколик, В. П. Карпов. Докл. АН СССР, 1959, **129**, 168.
13. В. П. Карпов, А. С. Соколик. Докл. АН СССР, 1961, **141**, 393.
14. A. L. Fugno, E. B. Cook a. o. Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1971, p. 593.
15. В. С. Бабкин, А. В. Вьюн.— В сб.: Горение и взрыв. М., «Наука», 1972.
16. В. Н. Гудкович, Э. А. Грановский, Б. Г. Пискунов. ФГВ, 1975, **11**, 251.
17. А. Д. Марголин, В. П. Карпов, Е. С. Северин. ФГВ, 1973, **9**, 862.

## ДВУМЕРНАЯ ЗАДАЧА ОБ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ПЛАМЕНИ

*Б. В. Новожилов, В. С. Посвянский*

*(Москва)*

Проблема вычисления пределов горения, обусловленных конечностью диаметра трубы, по которой распространяется пламя, чрезвычайно трудна. Это двумерная задача теории диффузии и теплопроводности, осложненная узостью зоны химических реакций, движением газа и необходимостью нахождения собственного значения скорости пламени. Однако потребности практики, в частности техники безопасности, требуют ее решения.

В предлагаемой работе в качестве первого шага проведено численное решение двумерной задачи теории горения, по-видимому, в простейшей постановке. Рассмотрено изотермическое пламя, которое распространяется из-за концентрационной нелинейности скорости химического превращения. Отсутствие разогрева и, следовательно, расширения газа позволяет не рассматривать уравнение движения газа. С другой стороны, слабая (степенная в отличие от аррениусовской) нелинейность скорости химической реакции не приводит к узким зонам пламени, что упрощает численный счет. Неоднородность задачи связана с гибелью промежуточного вещества на стенках. Найдены пределы и скорость горения в зависимости от характера и величины гетерогенного обрыва. Рассмотрена возможность перехода к одномерному приближению.

**Постановка задачи.** Рассмотрим одну из простейших кинетических схем, которая приводит к режиму распространения холодного пламени. Так же, как и в [1], предположим, что реакция между исходными веществами А и В идет цепным путем через два активных центра  $n_1$  и  $n_2$ , причем имеется квадратичное разветвление цепей через некоторый