

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗАГРОМОЖДЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВА НА СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ГАЗОВ

*В. А. Горев, В. Н. Федотов*

*(Москва)*

При аварийных взрывах газовых облаков в открытом пространстве могут реализоваться режимы горения как с минимальными скоростями пламени (несколько метров в секунду), так и со сверхзвуковыми. В [1] обнаружено, что преграды, находящиеся в области взрыва, способны интенсифицировать горение. Более поздние исследования расширили представления о механизме действия преград на скорость горения [2, 3] и дали фактический материал, количественно описывающий явление [3, 4]. Из этих работ, в частности, следует, что пламя продолжает ускоряться только в случае повторения препятствий. Например, в [4] достигнута скорость пламени 400 м/с для метановоздушной смеси. Действие одиночного препятствия вниз по потоку ослабевает и начальное значение скорости восстанавливается. В [1, 2] рассматривалось горение в трубах и каналах, в [3, 4] — между двумя плоскими поверхностями.

Применительно к взрыву в свободном пространстве изучалось действие сферических сеток на скорость горения газов [5, 6]. Отмечено, что внутри первого сеточного препятствия газ горит, как в свободном пространстве, а после препятствия скорость горения меняется, и величина  $\alpha = w_2/w_1$  характеризует действие преграды ( $w_1$  — скорость пламени до преграды,  $w_2$  — сразу после нее). В [5] изучалось действие трех концентрически расположенных сферических сеток диаметром 9, 14 и 19 см. Вторая сетка добавляла множитель 2 к значению  $\alpha$  первой сетки, третья не давала дополнительного эффекта. Максимальное действие трех сеток на горение воздушных смесей получалось для ацетиленовоздушной смеси: здесь наблюдалось 12-кратное увеличение скорости горения. Сетки, из которых изготавливались сферы, обладали проницаемостью (отношение площади отверстий к площади всей сферы)  $\psi > 0,65$ .

В [6] в качестве препятствий использовались перфорированные сферы диаметром  $d = 110$  и  $220$  мм и толщиной стенок 1 мм. Диаметр отверстий и их число были различны в отдельных сферах,  $\psi = 0,1 \div 0,37$ . При прохождении пламени через сферу скорость горения увеличивалась тем больше, чем меньше была проницаемость препятствия. Максимальное увеличение  $w$  от действия препятствия в виде сферы с  $d = 220$  мм и  $\psi = 0,09$  было 12-кратным для водородовоздушной смеси стехиометрического состава. После прохождения горения последовательно через две сферы диаметра. В [7] проведены крупномасштабные опыты с облаками полусферической формы объемом до  $2000$  м<sup>3</sup>. Изучалось и влияние на скорость горения преград, в качестве которых использовались сетки и отдельные конструкции. Препятствия не располагались по замкнутой поверхности вокруг источника зажигания, а находились только на поверхности земли. Изменения скорости горения из-за действия преград не обнаружено. Сведений о форме и размерах препятствий недостаточно для того, чтобы сделать определенные выводы относительно полученных результатов.

В настоящей работе изучали влияние повторяющихся преград на скорость горения в свободном пространстве. Особое внимание уделяли установлению зависимости  $w(\psi)$ . Проницаемость могла меняться в разных направлениях. В ряде опытов протяженность массива препятствий в вертикальном направлении была меньше, чем в горизонтальных, и меньше высоты облака, т. е. имел место случай, когда пламя в двух направлениях распространялось внутри массива преград, а в одном — без них.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. На горизонтальном столе устанавливался короб 1 без дна с основанием

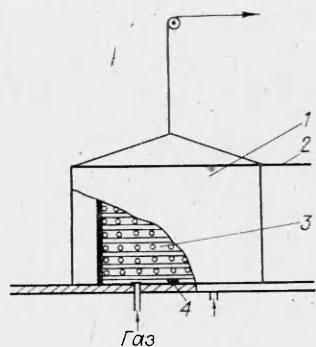


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

45 × 45 и высотой 30 см, закрытый сверху выдвигной крышкой 2. Внутри короба помещалось препятствие 3, а источник зажигания 4 крепился на поверхности стола в геометрическом центре проекции препятствия на стол. Газовая газозвоздушная смесь подавалась в четырех точках, расположенных по углам квадрата с центром в точке зажигания и со сторонами 15 см. Время подачи составляло 6 мин, расход 90 л/мин, что соответствовало 10-кратному объему короба. В крышке короба просверлено около 30 отверстий диаметром 1 мм, через которые осуществлялась продувка.

Концентрация горючего газа контролировалась взятием проб и измерялась хроматографом. Пробы показали, что при таком способе заполнения концентрация смеси по объему короба отличается не более чем на 0,05%. После прекращения продувки крышка выдвигалась, а короб поднимался вверх на высоту 1,5 м и смесь поджигалась. На горизонтальной поверхности стола вдоль оси  $x$  были вмонтированы 5 ионизационных датчиков; расстояния между источником зажигания, первым датчиком и следующими равнялось 5 см. Эти датчики отмечали момент прихода пламени в данную точку. Для определения скорости горения брался первый отклик датчика. Давление регистрировалось двумя индуктивными датчиками<sup>1</sup> ДМИ-0,3, расположенными на расстоянии 18 и 50 см от источника зажигания также вдоль оси  $x$ . Одновременно производилась киносъемка процесса скоростной кинокамерой типа «Хикам». Изучалось горение воздушных смесей пропана, этилена и ацетилена.

В первой серии опытов в качестве препятствий использовались решетки с квадратными ячейками, изготовленные из стержней диаметром 6 и длиной 400 мм. Расстояние между осями стержней в ячейке 20 мм. Решетки располагались одна над другой через  $20 \pm 2$  мм (рис. 2). С увеличением числа решеток  $n$  скорость пламени на выходе из препятствия увеличивается. Максимальная скорость, достигнутая на 10 решетках для этиленовоздушной смеси, составляла 125 м/с, пропановоздушной — 50 м/с. Для ацетиленовоздушной смеси при  $n = 7$  достигнута  $w = 200$  м/с. Опыты показали, что горение продолжает ускоряться в том случае, когда весь фронт пламени периодически взаимодействует с препятствиями. Если  $n < 5$ , верхняя часть фронта выходит из решеток и несмотря на то, что нижняя его часть подвергается воздействию преград, дальнейшее распространение горения идет с постоянной скоростью. Форма фронта пламени при этом отличается от сферической и становится более сплюснутой (рис. 3). Если  $n > 7$ , то заметного ускорения горения не наблюдалось.

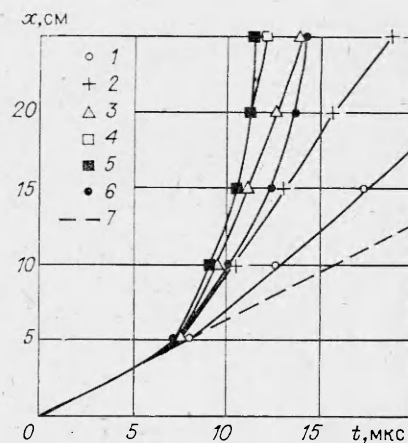


Рис. 2. Зависимость путь — время для пламени, распространяющегося по этиленовоздушной смеси.

Количество решеток (расстояние между ними 20 мм): 1 — 1, 2 — 2, 3 — 3, 4 — 5, 5 — 7 ÷ 10, 6 — 6 (расстояние 40 мм); 7 — горение без препятствий.

<sup>1</sup> Индуктивный датчик ДМИ-0,3 имеет линейную характеристику до давления 30 кПа и не требует специального охлаждения при работе в атмосфере продуктов сгорания, если время работы ограничено одной секундой.

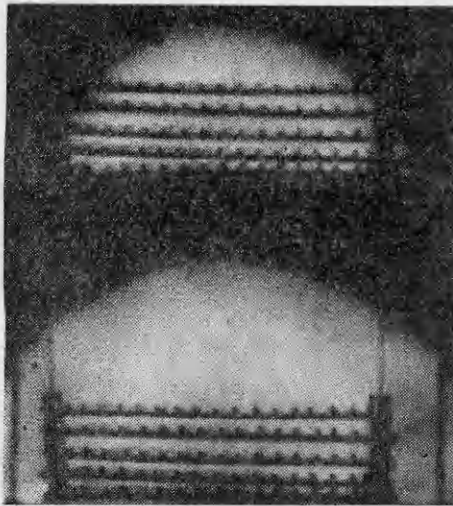


Рис. 3. Горение смеси ацетилен — воздух в присутствии преград; интервал между кадрами  $10^{-3}$  с.

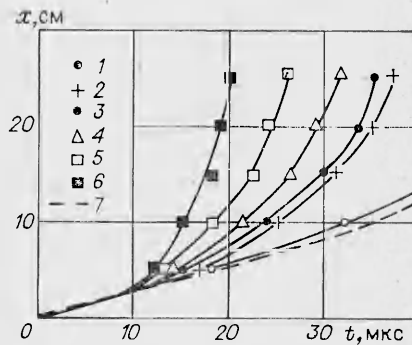


Рис. 4. Зависимость путь — время для пламени при различных типах препятствий.

1 —  $\psi_z = 0,85$ ,  $\psi_x = \psi_y = 0,92$ ; 2 —  $\psi_z = 0,49$ ,  $\psi_x = \psi_y = 0,82$ ; 3 —  $\psi_x = 0,93$ ,  $\psi_x = \psi_z = 0,7$ ; 4 —  $\psi_y = 0,93$ ,  $\psi_x = \psi_z = 0,7$ ; 5 —  $\psi_z = 0,49$ ;  $\psi_x = \psi_y = 0,63$ ; 6 —  $\psi_x = \psi_y = \psi_z = 0,42$ ; 7 — горение без препятствий.

В описанных опытах проникаемость преграды в вертикальном направлении  $z$  была меньше, чем в горизонтальных  $x$  и  $y$ ,  $\psi_z = 0,49$ ,  $\psi_x = \psi_y = 0,63$ . При удалении из каждой решетки поперечных стержней получалось препятствие с  $\psi_z = \psi_y = 0,7$  и  $\psi_x = 0,93$ . В этом случае отдельно измерялась скорость в направлениях  $y$  и  $x$ .

Из решеток с параллельно расположенными стержнями и с расстоянием между осями стержней 40 мм сделано препятствие с  $\psi_x = \psi_y = 0,92$ ,  $\psi_z = 0,85$ ; 6 решеток с квадратной ячейкой  $20 \times 20$  мм и расстоянием между ними 40 мм давали препятствие с  $\psi_z = 0,49$  и  $\psi_x = \psi_y = 0,82$ . Для уменьшения проникаемости в каждую ячейку решеток вставляли вертикальный стержень диаметром 6 и высотой 22 см. В результате получалась объемная кубическая решетка, которая по каждому главному направлению имела  $\psi_x = \psi_y = \psi_z = 0,42$ . Данные, полученные на этих препятствиях для пропановоздушной смеси, приведены на рис. 4. Если препятствие имеет различную проникаемость по координатам, наибольшее ускорение горения происходит в сторону наименьшей проникаемости. Скорость пламени в каком-либо направлении зависит не только от проникаемости по всем координатам. Из рис. 4 видно, что пламя в направлении  $x$  ускоряется препятствием с  $\psi_z = \psi_y = 0,7$  и  $\psi_x = 0,93$  сильнее, чем препятствием с  $\psi_x = \psi_y = 0,82$  и  $\psi_x = 0,49$ ; максимальная скорость на выходе из препятствия 70 м/с для пропана получена на решетках с  $\psi_x = \psi_y = \psi_z = 0,42$ .

Для каждой из исследуемых смесей на установке измерена скорость горения в отсутствие препятствий: для пропановоздушной смеси  $w_0 = 2,9$  м/с, этиленовоздушной  $w_0 = 6,3$ , ацетиленовоздушной  $w_0 = 16,5$  м/с. Изменение скорости пламени в отсутствие препятствий было незначительным.

На рис. 2 и 4 штриховые линии показывают результаты опытов без преград по записи только двух датчиков. Если эти линии продолжить до 5-го датчика, то характер их не изменится. Такое поведение скорости пламени говорит о том, что эффекты, связанные с движением короба, на расстояниях, где расположены датчики, не проявляются. Это можно объяснить тем, что слои газа, прилежащие к стенкам короба и возмущаемые при его движении, вытесняются горячими газами дальше от центра.

Опыты показали, что на использованных нами препятствиях пламя ацетилена ускоряется лучше, чем этилена, а последнее лучше, чем пропана. Например, препятствие из пяти решеток с квадратной ячейкой

20 × 20 мм увеличивало скорость горения пропана в 5,5 раза, этилена в 11 раз, а ацетилен в 12.

Таким образом, в условиях опытов данной работы в отличие от [5, 6] ускорение горения продолжалось до тех пор, пока на пути фронта пламени находились преграды. Эта разница может быть объяснена следующими рассуждениями.

В сферически-симметричном случае частицы газа, удаленные в начальный момент на  $R_0$  от места зажигания, сгорают на расстоянии  $\bar{R}_1 = R_0 \sigma^{1/3}$  ( $\sigma$  — степень расширения при горении). Пусть радиус первой сферической сетки  $R_1$ , тогда только те частицы газа, для которых  $R_1/\sigma^{1/3} < R_0 < R_1$ , при движении перед сферическим пламенем подвергнутся влиянию первой сетки, причем наибольшее действие оказывается на частицы, которые в момент прохождения сквозь отверстия будут ближе к пламени. Если радиус второй сетки  $R_2 > R_1 \sigma^{1/3}$ , то окажется, что частицы газа, проходящие через нее, не подвержены влиянию первой, и поэтому вторая сетка действует независимо от первой. Похожая ситуация имеет место в работе [6]. Таким образом, можно сформулировать необходимое условие совместного действия преград с номерами  $n-1$  и  $n$ :  $R_n/R_{n-1} < \sigma^{1/3}$ .

В [5] использовались сетки с  $d = 9, 14$  и  $18$  см, и тем не менее на третьем препятствии ускорение не наблюдалось. Это могло происходить по следующим причинам: во-первых, диаметр проволоки, из которой изготавливались сетки, мал:  $d_n = 0,4$  и  $0,8$  мм; расстояние между сетками  $\Delta R$  в этом случае во много раз больше диаметра проволоки ( $\Delta R \gg d$ ), поэтому уровень турбулентных пульсаций может заметно понизиться, прежде чем в этом месте начнется горение. Действительно, для расстояний от сетки  $x/d > 5$ , затухание турбулентности описывается соотношением  $u^2/\langle u'^2 \rangle \sim x/d$  [8]. В опытах [5], очевидно, и происходит заметная диссипация турбулентности между сетками. Конкретную количественную величину диссипации, начиная с которой горение не ускоряется на следующем препятствии, еще предстоит определить.

Вторая особенность, которую необходимо учитывать при горении газов в потоке с преградами, — образование застойных зон за ними. Их длина зависит от взаимного расположения преград  $l = (1 \div 3)d$  [9]. При взаимодействии пламени с потоком около препятствий поток газа устремляется с большой скоростью в сужение между препятствиями, не проникая в застойную зону непосредственно за препятствием. После того как поток проделает путь  $\sim 0,8l$ , часть газа из него подсасывается в застойную зону с тыльной стороны из-за искривления линий тока. Точно так же происходит движение горячих продуктов сгорания, причем пламя вытягивается вдоль линии тока, отделяющей застойную зону от внешнего потока. Затем пламя и горячие газы заходят с тыльной стороны в застойную зону: здесь уровень турбулентности особенно высок и происходит интенсивное горение внутри зоны. Такой последовательности событий способствует распределение скоростей осредненного и турбулентного течения за плохооб-

текаемым телом [10]. Пока происходит горение в застойной зоне, передние точки фронта пламени основного потока могут сместиться вверх по течению и начать обхват новой застойной зоны. Этот механизм реализуется при высоких скоростях горения газа, после того как скорость горения увеличилась в несколько раз. При малых скоростях пламени и больших проницаемостях

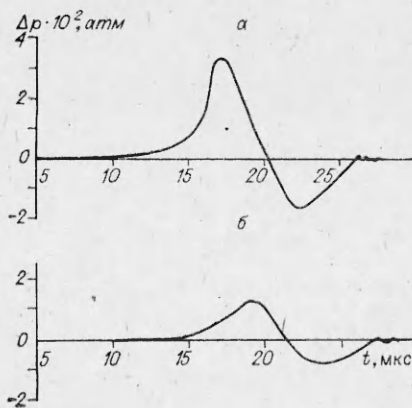


Рис. 5. Осциллограммы давления;  $\psi_z = \psi_{z_0} = 0,42$ ; смесь пропан — воздух. Расстояние от места зажигания, см: а — 18, б — 50.

препятствий пламя за препятствием движется как по потоку, так и перпендикулярно, т. е. внутрь застойной зоны, потому что скорости потока ненамного больше видимой скорости пламени, и оно не сносится потоком. В этом случае реализуется фронтальное горение с развитой поверхностью [11].

На рис. 5 приведены характерные осциллограммы давления. Профиль волн давления в описанных экспериментах оказался неожиданно гладким и по форме аналогичен профилю волны давления от сферического горения в отсутствие препятствий. И это несмотря на то, что ближайший датчик находился внутри массива препятствий. Максимально избыточное давление на ближнем датчике хорошо описывается формулой

$$\frac{\Delta p_{\max}}{p_0} = \frac{3}{2} \gamma \frac{\left(\frac{w}{c}\right)^2}{1 + \frac{w}{c}} \frac{\sigma - 1}{\sigma},$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты;  $c$  — скорость звука. Давление на дальнем датчике было в 2—3 раза меньше.

Итак, в работе исследованы условия ускорения пламени, по форме близкого к сферической, при его прохождении через препятствия. Получено, что для постоянного ускорения необходимо, чтобы препятствия были повторяющимися во всех направлениях. Если проницаемость препятствий  $\psi$  во всех направлениях одинакова, фронт пламени имеет сферическую форму, а ускорение зависит от величины проницаемости. В препятствиях с меньшим значением  $\psi$  пламя ускоряется сильнее. В случае различной проницаемости в разных направлениях фронт пламени вытягивается в сторону меньшей; соответственно и ускорение в этом направлении больше. Значения  $\psi$  в направлениях, перпендикулярных рассматриваемому пространству пламени, оказывают схожее действие на скорость пламени, т. е. большим  $\psi$  соответствует меньшая  $w$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Щелкин. ЖТФ, 1947, 27, 5, 613.
2. P. Wolanski, S. Woyeicki. Arch. comb., 1981, 1, 1/2, 69.
3. J. O. Moen, M. Donato e. a. Comb. Flame, 1981, 39, 21.
4. J. O. Moen e. a. Progr. Astron. Aeron., 1981, 75, 33.
5. K. S. Dörge, D. Pangritz, H. G. Wagner. Acta Astron., 1976, 3, 1069.
6. В. А. Горев, С. Н. Мирошников. Хим. физика, 1982, 1, 6, 854.
7. C. D. Lind. Loss Prev., 1975, 9, 101.
8. И. О. Хинце. Турбулентность. М.: Физматгиз, 1963.
9. Г. Н. Абрамович. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.
10. S. Fujii. Trans. ASME Fluids Eng., 1981, 10, 2, 328.
11. C. Chan, J. O. Moen. Comb. Flame, 1983, 49, 27.

### ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННОГО ГОРЕНИЯ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ

*В. К. Булгаков, А. М. Липанов, А. Ш. Камалетдинов  
(Устинов)*

В настоящей работе проводится анализ результатов численных расчетов горения конденсированных веществ при обдуве с целью исследования физических процессов, определяющих эрозионный эффект, и количественной оценки влияния особенностей обдуваемого потока (геометрии канала, интенсивности турбулентности набегающего потока), теплофизических параметров газовой фазы, начальной температуры вещества, кинетики брутто-реакций в газовой и конденсированной фазах на эрозионный эффект. Методика расчета, ее теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение даны в [1]. Физические и кинетические характе-