

В. И. Макеев, А. А. Пономарев, В. В. Строгонов

ГОРЕНИЕ И ПЕРЕХОД К ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ С ЗАГРОМОЖДЕНИЕМ

Экспериментально изучалась возможность перехода от дефлаграции к детонации смесей $\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + \beta\text{N}_2)$ и $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \beta\text{N}_2$ ($\beta = 0 \div 3,76$) в загроможденном пространстве. Для загромождения использовались в различных комбинациях три тонкостенные металлические концентрические сферы-турбулизаторы с большим количеством отверстий. Коэффициент проницаемости сфер составлял $0,1 \div 0,4$, соотношение диаметров $1:2:4$. Переход от дефлаграции к детонации в первой смеси наблюдался при $\beta \leq 1$, а во второй — при $\beta \leq 3,2$.

Вопросы перехода медленного сферического горения в самоподдерживающуюся детонацию имеют принципиальное значение с научной и практической точек зрения. Это явление экспериментально наблюдалось для топливно-кислородных смесей [1, 2], однако для воздушных смесей прямые доказательства возникновения сферической детонации отсутствуют. Вместе с тем, согласно существующей теории гидродинамической неустойчивости и автотурбуликации фронта нормального горения, в горячих облаках достаточного больших размеров неизбежен переход от дефлаграции к детонации. Экстраполяционные оценки показывают, что критический размер облака, при котором вероятность возникновения детонации высока, составляет для воздушных смесей водорода 70 м, пропана 3,5 км, метана 5 км [1]; по другим оценкам, для водорода 109,6 м, метана 398 м [2].

Искусственная турбулизация процесса с помощью различных препятствий на пути распространяющегося пламени должна привести, по-видимому, к существенному сокращению критических размеров, и возникающая в этом случае детонационная волна может стать источником возбуждения детонации в неограниченном пространстве.

Попытки вызвать детонацию в газовой смеси на сферических, сетчатых или перфорированных препятствиях предпринимались в работах [3, 4]. Во всех опытах увеличивалась скорость горения в зависимости от степени проницаемости препятствий: сетчатые препятствия с проницаемостью $\Psi = 0,6 \div 0,9$ давали рост в 2—3 раза, перфорированные ($\Psi = 0,1 \div 0,5$) — в 8—10 раз. Однако эффект ускорения был ограничен областью, близко примыкающей к препятствию; на расстояниях 1—2 радиусов сферы скорость горения снижалась до значения, соответствующего нормальному распространению.

Если чередующиеся препятствия охватывают весь объем смеси, наблюдаются качественно новые эффекты. Так, в работе [5] в объеме стехиометрической водородно-воздушной смеси, равном $3,4 \text{ м}^3$, заполненном металлической решеткой с ячейкой 0,1 м, скорость пламени при иницировании слабым источником достигала таких значений, что в воздухе образовывалась ударная волна с параметрами, близкими к параметрам волны от детонации.

В [6] экспериментально исследовалось горение смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \beta\text{N}_2$ ($\beta = 0 \div 3,76$) в больших цилиндрических объемах (6 м^3) с предварительной турбулизацией всей смеси с помощью мелкодисперсной воды. Здесь фоторегистрацией зафиксирован переход в детонацию при $\beta \leq 2$; в воздушных смесях ($\beta = 3,76$) отмечено лишь ускоренное распространение пламени.

Цель настоящей работы — дальнейшее изучение ускоренного горения газовых смесей и перехода в детонацию на препятствиях.

Опыты проводили с предварительно перемешанными смесями, которыми заполняли резиновые тонкостенные оболочки шарового зонда объ-

Таблица 1

Номер турбулизатора	D , м	$V \cdot 10^3$, м ³	N	d , мм	Ψ
1	0,11	0,6	310	7,5	0,37
2	0,22	5,6	370	7,5	0,11
3	0,38	28,7	1028	12,0	0,26

Примечание. D , V — диаметр и объем турбулизаторов, N , d — число и диаметр отверстий, Ψ — отношение площади всех отверстий к площади поверхности сферы.

и длиной 10 мм, через которую осуществлялся разряд конденсатора с запасенной электрической энергией от 1 до 10 Дж. Центр шара располагался на высоте 2,5 м над поверхностью земли. Съемка проводилась фоторегистратором ФР-11М и скоростной кинокамерой «Пентацет-16». Волны сжатия в окружающем воздухе регистрировали пьезодатчиками типа ЛХ-610 и датчиками ДМИ-1. По экспериментально измеренным значениям видимых скоростей горения u , характеру профиля и уровню избыточного давления в воздушной ударной волне определяли режим горения. Параметры и результаты экспериментов представлены в табл. 2 (нумерацию турбулизаторов — см. табл. 1).

При дефлаграции измеренные значения $u = 50 \div 500$ м/с. Процесс распространения пламени после выхода его из последнего препятствия носил явно нестационарный характер. Для дефлаграции характерно наличие отрицательной фазы волны разрежения с амплитудой, близкой или превосходящей амплитуду волны сжатия. При переходе к детонации величина $u \sim 2 \div 3$ км/с постоянна до границы горючей смеси. Фаза сжатия в этом случае по амплитуде существенно превышала фазу разрежения.

Проведенные эксперименты показали, что при наличии сфер-турбулизаторов переход от дефлаграции к детонации наблюдается в смесях $\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + \beta\text{N}_2)$ при $\beta \leq 1$ и $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \beta\text{N}_2$ при $\beta \leq 3,2$. При $\beta \geq 1,5$ для смесей метана и $\beta \geq 3,4$ для смесей водорода перехода в детонацию не было при любом сочетании турбулизаторов. В этом случае на выходе из внешней сферы фронт пламени имел форму вытянутых «язычков». Резкое возрастание поверхности пламени приводило к его ускорению.

Таблица 2

Смесь	Комбинация турбулизаторов	β	E_T , кДж	Процесс (дефлаграция D_1 , детонация D_2)
$\text{CH}_4 + 2(\text{O}_2 + \beta\text{N}_2)$	1	0	8	D_1
	2	0	61	D_2
	1, 2	0	61	D_2
	1	0,5	46	D_1
	2	0,5	260	D_2
	1, 2	0,5	46	D_2
	1, 2	1	40	D_1
	1, 2, 3	1	206	D_2
	1, 2, 3	1,5	172	D_1
	1, 2, 3	3,76	98	D_1
$2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \beta\text{N}_2$	3	1	155	D_2
	1, 2	1	30	D_2
	3	2	124	D_2
	1, 2	2,5	21,9	D_2
	1, 2	3	20	D_2
	1, 2	3,2	19,4	D_2
	1, 2	3,4	18,8	D_1
	1, 2, 3	3,4	97	D_1
	1, 2, 3	3,76	92	D_1

Зависимость $E_{кр}(\beta)$.

1 — смеси метана; 2 — смеси водорода (темные точки — детонация, светлые — дефлаграция); 3 — [7]; 4 — [11]; 5 — [12]; 6 — [13].

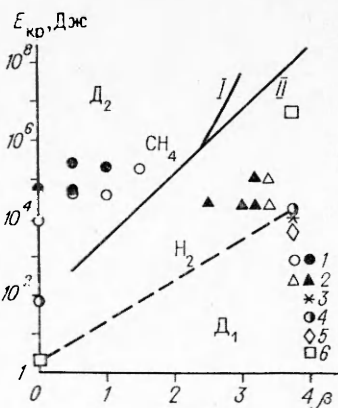
Однако при расстоянии 1—2 диаметра внешней сферы значение u резко уменьшалось, приближаясь к скорости горения данной смеси без турбулизаторов.

Таким образом, небольшое обогащение кислородом водородно-воздушной смеси (до $\beta = 3,2$, что соответствует увеличению содержания кислорода в воздухе от 21 до 23,8 %) при наличии загромождения пространства в объеме менее $6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ привело к возникновению самоподдерживающейся детонации; для метана аналогичный эффект достигался при обогащении воздуха кислородом до 50 %.

Отсутствие информации о процессах горения, протекающих внутри турбулизаторов, крайне затрудняет анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных. Вместе с тем данные табл. 2 дают возможность предположить, что детонация в объеме возникает в результате взрывного горения смеси внутри турбулизаторов. Корреляцию данных можно осуществить по энергии, высвобождаемой при взрыве локального объема смеси.

Известно, что для прямого инициирования детонации в горючей газовой смеси необходимо обеспечить минимальную (критическую) энергию $E_{кр}$, которая в общем случае зависит от скорости энерговыделения инициатора (мощности) и состава горючей смеси. Для ударного источника инициирования типа ВВ для возбуждения детонации в водородно-воздушной смеси в работе [7] получено минимальное значение $E_{кр} = 7,8 \text{ кДж}$. Как показали проведенные эксперименты, при использовании газовой смеси в качестве источника инициирования детонации критическая энергия газового заряда в несколько раз превосходит энергию заряда ВВ, что хорошо согласуется с выводами работы [8].

На рисунке представлена зависимость $E_{кр}$ от состава исследуемых смесей для двух источников возбуждения детонации — ВВ и газового заряда. В случае газового заряда в качестве $E_{кр}$ взята полная энергия сгорания смеси $E_{т}$, содержащаяся внутри внешнего турбулизатора. Область D_1 соответствует дефлаграционному сгоранию смеси, D_2 — детонационному. Кривые 1 [10] и 2 [9] для смесей метана получены экстраполяцией экспериментальных данных для ВВ. Экстраполяция результатов для водородно-воздушной смеси ($\beta = 3,76$) показывает, что для возбуждения детонации газовым зарядом необходима энергия 4—10 МДж, что соответствует энергии взрыва смеси в загроможденном пространстве с размерами $\sim 1 \text{ м}$.



ЛИТЕРАТУРА

1. Макеев В. И., Строгонов В. В., Болодьян И. А. // Проблемы пожарной безопасности зданий и сооружений: Материалы X Всесоюз. науч.-практ. конф.— М., 1990.
2. Нетлетон М. Детонация в газах.— М.: Мир, 1989.
3. Dorge K. J., Panqritz D., Wagner H. // Acta Astronautica.— 1976.— 3.— P. 1067—1076.
4. Горев В. А., Мирошников С. Н. // Хим. физика.— 1982.— № 6.— С. 854—858.
5. Гостинцев Ю. А., Лямин А. Г., Понов О. Е. // Вопросы атомной науки и техники: Атомно-водородная энергетика и технология.— М., 1987.— Вып. 1.— С. 62—63.
6. Макеев В. И., Пономарев А. А., Строгонов В. В. и др. // Проблемы горения и взры-

ва: Материалы IX Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— Суздаль, 1989.— С. 128—137.

7. **Макеев В. П., Гостинцев Ю. А., Строгонов В. В. и др.** Горение и детонация водородно-воздушных смесей в свободных объемах // ФГВ.— 1983.— 19, № 5.— С. 16—18.
8. **Borisov A. A., Khomik S. V., Mailkov A. E. et al.** // 11th Int. Symp. Combust. Process.— Miedzydroje, 1989, Abstr.— P. 95.
9. **Bull D. C., Elsworth J. E., Hooper C. et al.** // J. Phys. D: Applied Physics.— 1976.— 9.— P. 1991.
10. **Boni A. A., Chapman M., Cook J. L.** // 6th Int. Coll. on Gas Dynamics of Explosions and Reactive Systems.— Stockholm, 1977.— P. 1153.
11. **Бохон Ю. А., Шулепин Ю. В.** // Докл. АН СССР.— 1979.— 245, № 3.— С. 623—626.
12. **Bull D. C.** // Proc. Int. Special Meeting on fuel — air explosion.— Canada, 1982.
13. **Matsui H., Lee J. Y.** // XVII Int. Symp. on Combust.— England, 1978.— P. 1269—1280.

г. Балашиха
