

УДК 532.5:536.46

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

С. М. КОГАРКО, О. Е. ПОПОВ, С. М. ШЕПАРНЕВ

**О ВОЗМОЖНОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛН
ДАВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ ПРИ БЫСТРОМ ГОРЕНИИ
ГАЗООБРАЗНЫХ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ**

(Представлено академиком В. Н. Кондратьевым 15 II 1974)

Детонационный режим горения взрывчатой газовой смеси при осуществлении его в контакте с водной средой является источником волн давления в жидкости, возбуждающим сейсмические колебания в подводном грунте. Такой метод возбуждения колебаний заменяет взрыв конденсированного взрывчатого вещества (ВВ) в морских геологических исследованиях, являясь методом многоразового действия, не влияющим на ихтиофауну ⁽¹⁾.

В топливно-кислородных (ТК) смесях сферическую детонацию можно вызвать выходящей в объем детонационной волной, сформировавшейся в трубке при зажигании сравнительно слабым источником (искра, накаливаемая спираль). Для этого необходимо, чтобы диаметр инициирующей волны был не менее $d \approx 15L$, где L — ширина зоны реакции ⁽²⁾.

В менее реакционноспособных топливно-воздушных (ТВ) смесях ширина зоны настолько велика, что возбуждение волн детонацией невозможно без использования ВВ. По данным ⁽³⁾ минимальный вес заряда тротила равен 0,15 кг для смесей пропана и 1,0 кг — метана с воздухом. Использование таких зарядов нежелательно и нецелесообразно, так как для применяемых в морской сейсморазведке взрывчатых смесей на инициирование придется затрачивать больше энергии, чем выделяется при детонации газа.

По этой причине естественно поставить вопрос о том, можно ли возбуждать волны давления в воде при дефлаграционном горении ТВ-смеси, возникающем без применения ВВ. Решение этого вопроса до сих пор не было известно и является предметом настоящей работы.

Ламинарное горение, очевидно, не может вызвать заметных волн, так как оно сопровождается медленным расширением продуктов реакции в течение всего времени горения. Для формирования волн давления необходимо создать такие условия, чтобы процесс превращения исходной смеси в продукты реакции завершился при постоянном объеме и давление на границе раздела продукты — жидкость повысилось до величины давления взрыва P_v . Критерием может служить соотношение

$$t_r \ll T/2, \quad (1)$$

где t_r — время горения смеси, а $T/2$ — время расширения, определенное при условии мгновенного образования продуктов реакции и равное половине периода пульсации газового пузыря.

Интегрирование уравнений движения при сферическом подводном взрыве газовой смеси позволяет получить следующее приближенное (с точностью до 1%) выражение:

$$T/2 = R_0 \sqrt{\rho_0/P_0} (0,879 R_{\max}/R_0 + 0,710);$$

здесь R_0 и $R_{\max}$ — начальный и максимальный радиус газового пузыря, а ρ_0 и P_0 — плотность и давление жидкости на глубине взрыва. Для большинства газовых смесей $2,5 \leq R_{\max}/R_0 \leq 3,6$, где большие значения относят-

ся к кислородным смесям, а меньшие к воздушным. Определить t_r для различных режимов горения можно экспериментально по регистрациям изменения давления со временем в сосуде постоянного объема. В этих же опытах можно найти и величину давления взрыва.

Чтобы увеличить скорость сгорания ТВ-смеси, применили зажигание ее струями горячих продуктов детонации ТК-смеси, истекающими со звуковой скоростью из находящейся в центре объема вспомогательной камеры в виде сферической оболочки с отверстиями.

Таблица 1

Объем, л		P_v , бар	t_0 , мсек.	t_r , мсек.	$T/2$, мсек.	$2t_r/T$
ТВ-смесь	ТК-смесь					
0,5	0,05	8,3	18	0,2	14,4	0,014
3,1	0,3	8,6	38	0,4	26,5	0,015
6,3	0,6	8,8	53	0,6	33,8	0,018
	0,3			1,0		0,03
50	5,0	8,9	120	1,5	67,1	0,022
	1,0			5,3		0,08

Примечание. t_0 — время сгорания в ламинарном режиме.

Чтобы выяснить возможность масштабного моделирования, эксперименты проводили в сосудах объемом от 0,5 до 50 л, снабженных стеклами для регистрации процесса при помощи скоростной киносъемки. Одновременно пьезоэлектрическими и индуктивными датчиками регистрировали давление при горении, а позиционными датчиками фиксировали момент

Таблица 2

Время сгорания при различном начальном давлении P (бар) и различном содержании кислорода в инициирующей смеси

α	t_r , мсек					
	$P=0,5$	$P=0,7$	$P=1,0$	$P=1,5$	$P=2,0$	$P=3,0$
0,6	0,96	0,72	0,76	0,48	0,42	0,36
0,8			0,65			
1,0			0,60			
1,2			0,76			
1,4			0,97			

Примечание. Объем ТВ-смеси 6,3 л, объем ТК-смеси 0,6 л.

начала истечения струй в объем. Основной горючей смесью служила пропан-воздушная, а инициирующей — пропан-кислородная, в которой коэффициент избытка окислителя изменяли в пределах $0,6 \leq \alpha \leq 1,4$, для выяснения роли тепла и продуктов неполного горения в механизме процесса. Отношение вспомогательного и основного объемов от 0,02 до 0,1 позволяло варьировать величину энергии инициирования.

О степени интенсификации процесса судили по уменьшению времени сгорания по сравнению со временем протекания его в ламинарном режиме при зажигании слабым источником в центре объема. Установлено, что при объеме инициирующей смеси, составляющем 0,1 основного объема, время сгорания удается сократить на два порядка по сравнению с ламинарным (табл. 1). Максимальная интенсификация процесса достигается при составах смеси во вспомогательной камере, близких к стехиометрическим, и увеличивается с ростом начального давления (табл. 2).

Наблюдения за истечением продуктов детонации в ТВ-смесь и инертную среду методом скоростной киносъемки (рис. 1) позволяют заключить, что воспламенение происходит в зоне турбулентного смешения струй с горючей смесью с малыми (до 0,2 мсек.) задержками. Это объясняется высокой начальной температурой продуктов детонации $\sim 3500^\circ\text{K}$. Топливо-воздушная смесь вовлекается в движение струей, перемешивается с горячими продуктами, содержащими химически активные атомы и радикалы,

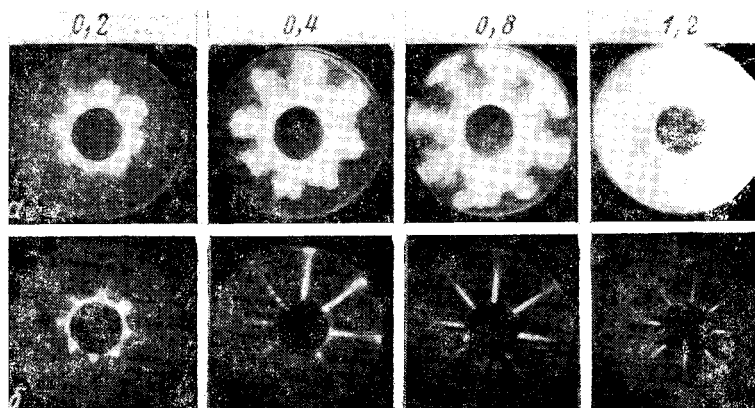


Рис. 1. Последовательность развития процесса истечения продуктов детонации в смесь пропан — воздух (а) и в инертную среду (б). Цифры у кадров указывают время (в мсек.) от момента начала истечения

и воспламеняется по цепочечно-тепловому механизму. Очаги горения, количество которых зависит от числа истекающих струй, быстро увеличиваются и одновременно сносятся потоком в сторону стенки.

Благодаря тому, что кинограммы сделаны для небольшого числа струй, динамика процесса отчетливо видна при частоте съемки $5 \cdot 10^3$ кадров в 1 сек. Записи давления, соответствующие этим кинограммам, показаны на рис. 2. Повышение давления в объеме уже заметно через 0,2 мсек. с начала истечения струй (0,8 мсек. с момента зажигания ТК-смеси).

Турбулентное распространение пламени между соседними околоструйными очагами горения ограничивает скорость завершения процесса. То же самое наблюдается при малых вспомогательных объемах, когда дальнобойность струй недостаточна. Минимальные времена сгорания, удовлетворяющие критерию (1), достигаются в том случае, когда струи равномерно пронизывают весь объем. В частности, вспомогательная камера имеет 70 отверстий диаметром 4 мм при объеме 0,6 л для оптимального инициирования взрыва 6,3 л пропан-воздушной смеси. При переходе к взрывам другого масштаба, сохраняя отношение радиусов вспомогательного $R_в$ и основного R_0 объемов, диаметр отверстий d изменяли в соответствии с условием $R_в/d = \text{const}$. Эксперименты показали, что в этом случае $t_r \sim R_0$ и критерий (1) выполняется. Масштабное моделирование невозможно только для объемов ТВ-смеси меньших 0,5 л, из-за того, что при малых диаметрах отверстий (до 0,9 мм) теплотери при истечении снижают температуру очага и воспламенения не происходит.

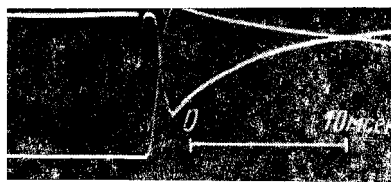


Рис. 2. Зависимость давления от времени в замкнутом объеме, соответствующая процессу на рис. 1, измеренная различными датчиками. На верхнем луче отмечен момент зажигания ТК-смеси. $P_в = 8,8$ бар

Волны давления, формирующиеся при подводном взрыве пропан-воздушной смеси, инициированном продуктами детонации смеси пропан — кислород, показаны на рис. 3. В воде образуется затухающая последовательность импульсов сжатия и разрежения от взрыва и пульсаций газового пузыря. Максимальное давление в волне, пересчитанное к поверхности пузыря, составляет 8,8 бар, что согласуется с измеренными значениями в замкнутом объеме. Давление уменьшается с расстоянием по закону $1/r$.

Сравнительные измерения волн, возникающих при детонации смеси пропан — кислород при энергии, равной энергии взрыва смеси пропан —

воздух, проведенные на расстояниях, больших радиуса заряда, показали, что амплитуды отличаются не более чем на 10%; при этом объем воздушной смеси должен быть в 4,1 раза больше.



Рис. 3. Типичная осциллограмма давления в воде при быстром горении смеси пропан — воздух. Амплитуда 0,86 бар, период пульсации 28,6 мсек

Основная доля энергии волн, образующихся при исследованном режиме быстрого турбулентного горения ТВ-смеси, сосредоточена в области низких частот до 200 гц для взрывааемых объемов, больших $3 \cdot 10^{-2}$ м³. Эта область представляет наибольший интерес для морской сейсморазведки.

Институт химической физики
Академии наук СССР
Москва

Поступило
5 II 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Г. С. Евдокимов и др., ДАН, т. 143, № 5, 1085 (1962). ² Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов, ЖТФ, т. 26, в. 8, 1744 (1956). ³ С. М. Когарко, В. В. Адущкин, А. Г. Лямин, Физика горения и взрыва, т. 1, № 2, 22 (1965).