

С. М. Когарко, В. В. Адушкин, А. Г. Лямин
(Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ДЕТОНАЦИИ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

По вопросу устойчивого распространения сферической детонационной волны в топливно-кислородных смесях и переходу горения в детонацию в объеме ацетилено-кислородной смеси опубликовано несколько работ [1, 2]. Не менее важным является исследование возможности устойчивого распространения сферической детонационной волны в топливно-воздушных смесях и изучение условий, при которых возможен переход распространяющегося сферического пламени в детонацию как в топливно-воздушных, так и топливно-кислородных смесях. Кроме того, было необходимо исследовать поле давления в окружающем пространстве при разных режимах горения. Исследование этих вопросов важно не только с научной точки зрения, но и представляет большой практический интерес для выработки научно обоснованных мероприятий по технике безопасности.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Приготовление взрывчатых смесей. В качестве газовых взрывчатых смесей применялись смеси метана, пропана и ацетилена с воздухом, а также метана и пропана с кислородом. Горючее в этих смесях находилось в стехиометрическом соотношении с кислородом: 1) $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7,52\text{N}_2$; 2) $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 + 18,8\text{N}_2$; 3) $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 9,4\text{N}_2$; 4) $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$; 5) $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$.

При приготовлении топливно-воздушных смесей в сферическую оболочку нагнетался воздух воздуходувкой через мерную шайбу (рис. 1). При постоянной скорости потока, контролируемой V-образным манометром, необходимый объем воздуха определялся временем работы воздуходувки по секундомеру. Затем из баллона подавалось необходимое количество горючего газа. Компоненты смеси перемешивались в течение

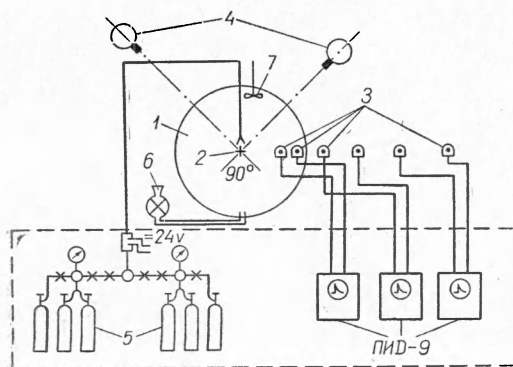


Рис. 1. Схема проведения опытов.
1 — сферический объем газовой смеси; 2 — источник зажигания; 3 — пьезодатчики; 4 — фотографическая аппаратура; 5 — устройство приготовления и напуска смеси; 6 — воздуходувка; 7 — вентилятор.

30 мин внутри сферического объема вентилятором производительностью $5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Перед иницированием смеси вентилятор выключался.

Приготовление топливно-кислородных смесей производилось одновременным напуском компонентов смеси из баллонов объемом 40 л через общий резиновый шланг диаметром 10 мм и длиной 50 м, соединяющий устройство приготовления смеси с резиновой оболочкой. В шланге происходило перемешивание горючего и окислителя и в сферическую оболочку поступала гомогенная взрывчатая смесь. Контроль за соотношением и количеством компонентов осуществлялся по показаниям образцовых манометров. Общее количество газовой смеси в оболочке определялось как произведение объема баллонов на разность между начальным и конечным давлением после напуска. Ошибка в определении количества компонентов в смеси составляла около 1—3%. Размеры резиновых оболочек (диаметр $\sim 0,7\text{--}3 \text{ м}$) позволяли приготавливать объемы газовых смесей от 0,15 до 15 м^3 . После наполнения оболочки газовой смесью толщина стенок была в среднем 0,1 мм, а вес границы поверхности $\sim 0,01 \text{ г}/\text{см}^2$. Атмосферное давление превышалось за счет упругости оболочки было не более $2 \cdot 10^{-3} \text{ атм}$.

Источники зажигания. Процессы горения газовых смесей в сферических объемах и параметры взрывных волн в окружающей атмосфере исследовались при применении различных источников зажигания.

1. Возбуждение детонации топливно-воздушных смесей в зависимости от их физико-химических свойств осуществлялось подрывом навесок тротила весом от 1,5 до 1000 г.

2. Сферическая детонация в топливно-кислородных смесях возбуждалась плоской детонационной волной, выходящей через конус в центре объема. В этом случае производилось зажигание смеси электрической искрой в начале шланга, соединяющего устройство приготовления смеси со сферическим объемом, где на расстоянии около 1 м от места зажигания горение переходило в детонацию. В центре объема шланг оканчивался расширяющимся конусом (угол раствора 24°), в котором поверхность плоской детонационной волны увеличивалась до 50 см^2 . При выходе из конуса в объем плоская детонационная волна трансформировалась в сферическую без разрушения. Способ трансформации плоской детонационной волны в сферическую был исследован в различных газовых смесях с конусами различных углов раствора в работах [1, 3].

3. Для иницирования горения в топливно-воздушных и в топливно-кислородных смесях током аккумулятора напряжением 24 в пережигалась вольфрамовая проволока длиной 10—20 и диаметром 0,1 мм, расположенная в центре объема. Энергия такого источника воспламенения порядка $10^{-1}\text{--}10^{-2} \text{ Дж}$.

Регистрирующая аппаратура. Регистрация изменения давления во времени в детонационных и ударных волнах производилась при помощи пьезокварцевых датчиков ножевого типа с записью на электронных осциллографических установках ПИД-9 [4]. При измерениях внутри и вблизи сферических объемов были использованы пьезодатчики с собственной частотой 150—170 кгц и размером чувствительной части 2—3 мм. В результате времена завала фронта волны в этом случае достигали 2—3 мксек. При измерениях вдали от взрывааемых объемов запись давления в волне проводилась пьезодатчиками с собственной частотой около 100 кгц и размером чувствительной части 18—20 мм. Завал фронта волны при записи этими датчиками достигал 10 мксек. Измерения волн внутри и вблизи сферических объемов до 5 радиусов проведены в пространстве над поверхностью земли, чтобы исключить влияние отраженной волны на фазу сжатия. Измерения в области расстояний 5—50 радиусов

объема произведены при наземных взрывах. В этом случае наземный взрыв рассматривался как воздушный с удвоенным объемом смеси.

Для регистрации движения фронта пламени, детонационной волны и расширения продуктов реакции были применены барабанные фоторегистраторы с диапазоном изменения скорости движения пленки от 0,001 до 10 м/сек. Расположенная в плоскости объектива щель вырезала изображение горизонтальной части сферического объема с источником зажигания в центре. Сферический фронт пламени или детонационной волны фотографировался на пленке, закрепленной на вращающемся барабане.

Методика обработки экспериментальных результатов. Скорости движения фронта пламени и детонационной волны в топливно-кислородных смесях измерялись по наклону изображения фронта на пленке и по известной скорости движения пленки. В топливно-воздушных смесях скорость детонационной волны измерялась по разности времен прихода фронта к двум пьезодатчикам, образующим базу 0,5 м вблизи периферии сферического объема. По осциллограммам давление — время детонационных и ударных волн измерялись основные параметры волны: времена прихода фронта волны t , максимальное избыточное давление Δp , импульс I и время действия τ_+ фазы сжатия. В каждом опыте наряду с амплитудой давления l_p производилась съемка калибровочного импульса с амплитудой l_k от известного напряжения U_k . Величина давления Δp определялась по формуле

$$\Delta p = \frac{U_k C_m}{S} \frac{l_p}{l_k}, \quad (1)$$

где C_m — масштабная емкость, измеренная с точностью 1%,
 S — чувствительность пьезодатчика, известная из предварительной тарировки ($[S] = b \cdot pF \text{ атм}$), а величина определяемого импульса по формуле

$$I = \int_0^{\tau_+} \Delta p(t) dt, \quad (2)$$

где τ_+ — время от момента прихода фронта волны до момента, когда избыточное давление вновь становится равным атмосферному и наступает фаза разрежения.

Ошибка измерений параметров детонационных и ударных волн составляет 5—10%.

Величина энергии E , выделяющейся при взрыве газовой смеси, определялась по значению теплотворности моля горючего по таблицам [5].

Т а б л и ц а 1

Состав смеси	ρ_0 , г/см ³	Q , ккал/кг	$\rho_0 Q$, ккал/м ³	$\beta = \frac{r_0}{E^{1/3}}$ м/ккал ^{1/3}
C ₂ H ₂ +2,5 O ₂ +9,4 N ₂	1,21 · 10 ⁻³	815	986	0,062
C ₃ H ₈ +5O ₂ +18,8 N ₂	1,25 · 10 ⁻³	668	835	0,066
CH ₄ +2O ₂ +7,52N ₂	1,17 · 10 ⁻³	660	772	0,068
C ₂ H ₆ +5O ₂	1,44 · 10 ⁻³	2400	3450	0,041
CH ₄ +2O ₂	1,13 · 10 ⁻³	2400	2710	0,045

Примечание. ρ_0 — начальная плотность газовой смеси, Q — удельная теплотворность смесей, $\rho_0 Q$ — объемная плотность энергии газовой смеси.

Исходные характеристики газовых взрывчатых смесей, использованных в экспериментах, при $t=15^\circ\text{C}$ и $p_0=1\text{ атм}$ приведены в табл. 1.

Энергия взрыва E связана с величиной взрываемого объема V_0 как:

$$E = \rho_0 Q V_0. \quad (3)$$

В последней графе табл. 1 приведено отношение начального радиуса r_0 объемов смеси к $E^{1/3}$, представляющее приведенный начальный радиус. Отсюда имеем связь

$$R/E^{1/3} = \beta \cdot R/r_0. \quad (4)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Детонация сферических объемов. 1. В результате проведения опытов установлено, что для возбуждения устойчивой сферической детонационной волны требуется различная величина энергии инициирования в зависимости от физико-химических свойств газовой смеси. Так, в топливно-воздушных смесях сферическая детонация возникает при инициировании ударной волной от взрыва навески ВВ. Детонация объемов топливно-кислородных смесей происходит от плоской детонационной волны, выходящей через конус внутри объема. В смеси состава $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ при зажигании раскаленной спиралью или электрической искрой наблюдается переход горения в сферическую детонацию (табл. 2).

Таблица 2

Состав смеси	$V_0, \text{ м}^3$	$q, \text{ г}$	$\xi, \%$	$d_k, \text{ м}$	$D_3, \text{ м/сек}$	$N, \text{ м/сек}$	$P_3, \text{ кг/см}^2$	$D_B, \text{ м/сек}$	$P_B, \text{ кг/см}^2$
$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 9,4 \text{ N}_2$	3 ÷ 10	1,5	0,5 ÷ 0,01	0,12	1870	350	20,5	2030	22,5
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 + 18,8 \text{ N}_2$	10 ÷ 15	155	2 ÷ 1	0,61	1730	450	19	1850	195
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7,52 \text{ N}_2$	10 ÷ 15	1000	13 ÷ 8	1,3	1540	950	16	1750	17
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$	0,15 ÷ 15				2320		34	2430	36
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	0,15 ÷ 15				2280		31	2389	31,8

Наряду с результатами измерений скорости D_3 и давления p_3 сферической детонационной волны табл. 2 приведены величины сферических объемов смесей V_0 , с которыми проводились эксперименты, минимальный вес q заряда тротила, обеспечивающий сферическую детонацию смеси, отношение ξ энергии инициатора к энергии, выделяющейся при взрыве газовой смеси. Видно, что величина ξ в экспериментах достаточно мала. По минимальной навеске ВВ была определена величина критического диаметра ударной волны d_k для возбуждения сферической детонации топливно-воздушных смесей. При этом считалось, что измеренное p_3 представляет давление волны в точке Жуге, а давление на фронте равно $2p_3$. Величина d_k характеризует легкость осуществления сферической детонации в газовых взрывчатых смесях. При взрывах зарядов q в воздухе измерена скорость фронта ударной волны N (инициирующие заряды ВВ свыше 200 г цилиндрической формы с $h \approx l$; измерения проводились по направлению оси цилиндра). Установлено, что величины N значительно ниже D_3 . В двух последних графах табл. 2 помещены результаты расчета скоростей детонации D_B и давлений p_B в точке Жуге по гидродинамической теории детонации с учетом процес-

сов диссоциации продуктов реакции. Расчет параметров детонации для смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ взят из работы [6], в работе [7] измерены скорости сферической детонации в смесях пропана с кислородом для состава $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ $D = 2350$ м/сек. Вычисленные параметры детонации несколько превосходят измеренные, однако различие находится в пределах точности измерений.

На рис. 2 приведена типичная фоторегистрация процесса сферической детонации.

2. Начальная интенсивность p_s ударной волны в воздухе при распаде детонационной волны на границе взрывчатой газовой смеси с воздухом может быть вычислена достаточно точно, поскольку скачок давления на этой границе невелик, а показатель адиабаты продуктов газового взрыва при



Рис. 2. Фоторазвертка сферической детонации смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ ($V_0 = 1,5$ м³; $r_0 = 0,71$ м), $2r_0$ — начальный диаметр объема.

их расширении изменяется незначительно. Для исследуемых смесей при выходе детонационной волны на поверхность объема осуществляется случай, когда давление образовавшейся воздушной ударной волны p_s меньше давления детонации p . В этом случае по продуктам реакции будет распространяться волна разрежения. Скорость истечения продуктов детонации запишется в виде

$$U_n = \frac{D}{k+1} \left(1 - \frac{C_0^2}{D^2} \right) + \frac{2kD}{k^2+1} \left[1 - \left(\frac{p_s}{p} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right]. \quad (5)$$

Скорость воздуха в образовавшейся ударной волне равна

$$U_s = \sqrt{\frac{2(p_s - p_0)^2}{\rho_0 [(k_0 + 1)p_s + (k_0 - 1)p_0]}}. \quad (6)$$

Исходя из равенства скоростей и давлений воздуха и продуктов взрыва на контактной поверхности, в результате совместного решения (5) и (6) определены начальные параметры ударной волны в окружающей атмосфере p_s и U_s (табл. 3). При расчете для воздуха принято

Таблица 3

Состав смеси	Параметры смеси						
	γ	C_0 , м/сек	k	D , м/сек	p , кг/см ²	p_s , кг/см ²	U_s , м/сек
$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 9,4 \text{N}_2$	1,38	341	1,25	1870	20,5	16,6	980
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 + 18,8 \text{N}_2$	1,38	335	1,25	1730	19	15,2	930
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7,52 \text{N}_2$	1,38	845	1,25	1540	16	12,4	890
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$	1,34	308	1,24	2320	34	26,0	1260
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$	1,31	344	1,24	2280	31	25,2	1230

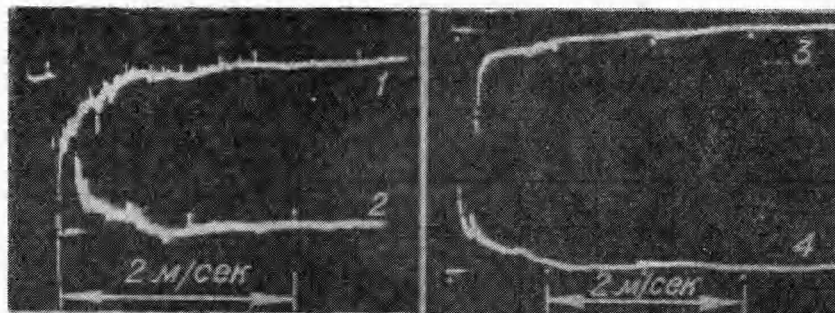


Рис. 3. Записи давление — время детонационной волны.
 1 — $\Delta p = 27,0 \text{ кг/см}^2$; 2 — $\Delta p = 30,0 \text{ кг/см}^2$; 3 — $\Delta p = 18,5 \text{ кг/см}^2$; 4 — $\Delta p = 20,0 \text{ кг/см}^2$.

$k_0 = 1,4$; $p_0 = 1,013 \cdot 10^6 \text{ бар}$; $\rho_0 = 1,29 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$, для смесей — экспериментально измеренные параметры детонации.

3. Образцы осциллограмм давление — время для детонационной волны показаны на рис. 3 и ударной на рис. 4. Измеренные по записям давление — время основные параметры ударных волн представлены ниже в соответствии с принципом энергетического подобия [8]. Формулы энергетического подобия для параметров воздушной ударной волны сферического взрыва в условиях стандартной атмосферы запишутся в виде

$$\Delta p = f_1\left(\frac{R}{E^{1/3}}\right); \quad \frac{I}{E^{1/3}} = f_2\left(\frac{R}{E^{1/3}}\right); \quad (7)$$

$$\frac{\tau_+}{E^{1/3}} = f_3\left(\frac{R}{E^{1/3}}\right).$$

Эти зависимости отражают установленный при взрывах ВВ опытный факт, что параметры ударной волны на некотором расстоянии R от источника взрыва зависят только от энергии взрыва E и не зависят от прочих свойств ВВ. В дальнейшем приняты обозначения:

$$R^0 = R/E^{1/3}; \quad t^0 = t/E^{1/3}; \quad I^0 = I/E^{1/3}; \quad \tau_+^0 = \tau_+/E^{1/3}, \text{ где } [R] = \text{м}; [E] = \text{ккал};$$

$$[t] = [\tau_+] = \text{м/сек}; [\Delta p] = \text{кг/см}^2; [I] = \text{кг} \cdot \text{сек/м}^2.$$

Результаты измерений максимального давления Δp представлены на рис. 5 в зависимости от расстояния R^0 до центра взрыва. Вертикальным пунктиром обозначены приведенные начальные радиусы сферических объемов газовых смесей (величины β из табл. 1). Измерения Δp

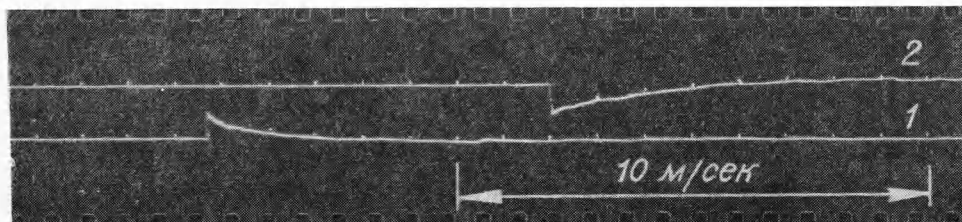
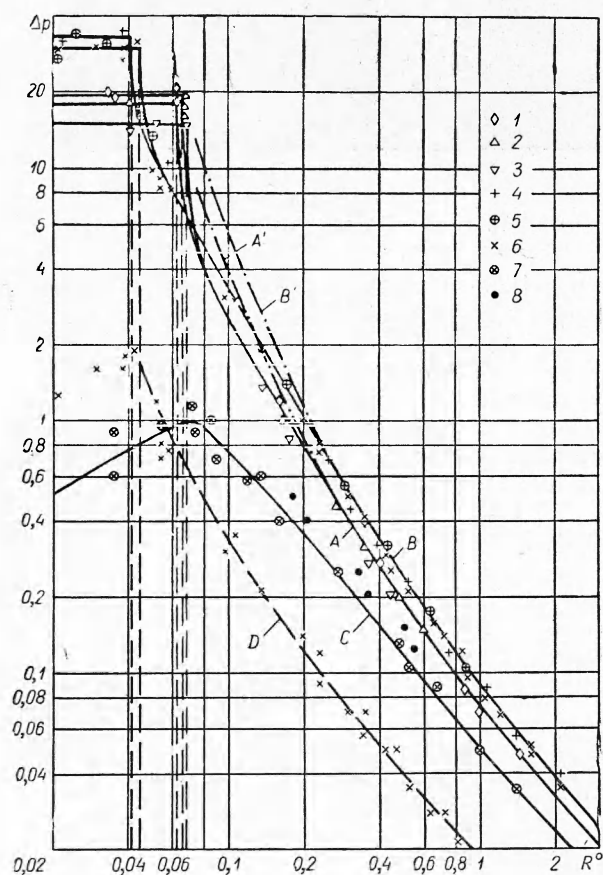


Рис. 4. Записи давление — время ударной волны в окружающей атмосфере.
 1 — $\Delta p = 1,9 \text{ кг/см}^2$; 2 — $\Delta p = 0,5 \text{ кг/см}^2$.

при детонации исследованных смесей распадаются на две группы: кривая А проведена по величинам Δp при детонации топливно-воздушных смесей, кривая В — при детонации топливно-кислородных смесей. Различие в измерениях Δp в этих двух случаях составляет 20–25%. Очевидно, это различие обусловлено увеличением объемной плотности энергии в источнике взрыва при переходе от смесей с воздухом к смесям с кислородом.



А именно в этом случае плотность энергии в источнике взрыва возросла в 3–4 раза. Таким образом, при взрывах газовых смесей в воздухе наряду с общим запасом энергии в источнике взрыва становится существенной и ее плотность. В области расстояний $R^0 > 0,3$ ($\Delta p < 0,5 \text{ кг/см}^2$) зависимость максимального давления Δp от расстояния R и энергии смеси E в случае

Рис. 5. Зависимость максимального давления ударной волны от расстояния.

1 — детонация смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{воздух}$; 2 — детонация смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{воздух}$; 3 — детонация смеси $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{воздух}$; 4 — детонация смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$; 5 — инициирование горения смеси $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$ пережиганием проволоочки; 6 — детонация смеси $\text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{O}_2$; 7 — инициирование горения смеси $\text{C}_2\text{H}_6 + 2\text{O}_2$ пережиганием проволоочки.

детонаций топливно-воздушных смесей соответствует формуле, аналогичной для случая взрыва конденсированного ВВ в воздухе [6]

$$\Delta p = 0,6 \cdot 10^{-3} \frac{E^{1/3}}{R} + 1,4 \cdot 10^{-2} \frac{E^{2/3}}{R^2} + 2,5 \cdot 10^{-3} \frac{E}{R^3}; \frac{R}{E^{1/3}} > 0,3. \quad (8)$$

При детонации топливно-кислородных смесей

$$\Delta p = 0,67 \cdot 10^{-1} \frac{E^{1/3}}{R} + 1,7 \cdot 10^{-2} \frac{E^{2/3}}{R^2} + 3,5 \cdot 10^{-3} \frac{E}{R^3}; \frac{R}{E^{1/3}} > 0,3. \quad (9)$$

Зависимости (8), (9) на рис. 5 изображены штрих-пунктиром. Видно, что в области от $1 r_0$ до $5 \div 7 r_0$ экспериментальные точки располагаются ниже. Очевидно, в пределах этой области, сказывается влияние продуктов взрыва на ударную волну. Для подсчета величин давлений в этой области, за исключением узкой зоны около $0,25 r_0$ вблизи

объема, можно пользоваться эмпирическими формулами. В случае детонации топливно-воздушных смесей

$$\Delta p = \frac{0,052}{R^{0,7}}; \quad 0,08 \leq R^0 \leq 0,3 \quad (10)$$

и для топливно-кислородных смесей

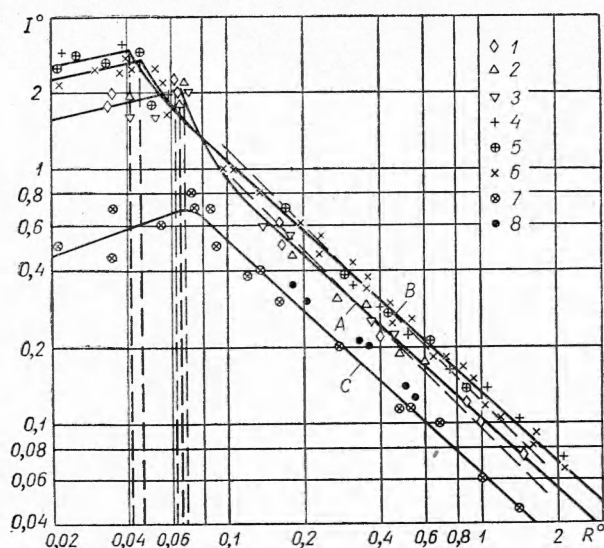
$$\Delta p = \frac{0,068}{R^{0,7}}; \quad 0,05 \leq R^0 \leq 0,3. \quad (11)$$

В узкой зоне вблизи детонирующих объемов, равной примерно $0,25 r_0$, происходит сильное ослабление ударной волны. Максимальное давление уменьшается в два раза по сравнению с начальной интенсивностью волны. Это объясняется чрезвычайно крутым спадом давления за фронтом ударной волны, образовавшейся в воздухе вблизи объема.

Измеренные величины импульсов детонационных и ударных волн представлены на рис. 6. В случае детонации газовых смесей импульсы распадаются на две группы: по ве-

Рис. 6. Зависимость импульса волны от расстояния.

1 — детонация смеси C_2H_2 +воздух; 2 — детонация смеси C_2H_6 +воздух; 3 — детонация смеси CH_4 +воздух; 4 — детонация смеси C_2H_6 + $5O_2$; 5 — инициирование горения смеси C_2H_6 + $5O_2$ пережиганием проволоочки; 6 — детонация смеси CH_4 + $2O_2$; 7 — инициирование горения смеси CH_4 + $2O_2$ пережиганием проволоочки.



личинам импульсов топливно-воздушных смесей проведена кривая А, и топливно-кислородных — кривая В. Различие измеренных величин импульсов при $R^0 > 0,1$ составляет примерно 25%. Зависимость импульса А воздушной ударной волны от расстояния R и энергии смеси E при детонации топливно-воздушных смесей может быть представлена в виде

$$I = 9,5 \cdot 10^{-2} \frac{E^{2/3}}{R}, \quad (12)$$

при детонации топливно-кислородных смесей

$$I = 12 \cdot 10^{-2} \frac{E^{2/3}}{R}. \quad (13)$$

Зависимости (12), (13) на рис. 6 показаны пунктиром.

Результаты измерений времени действия τ_1 волн при газовых взрывах в зависимости от расстояния приведены на рис. 7. Случай детонации топливно-воздушных смесей представлен кривой А, топливно-кислородных — кривой В. Видно, что при выходе волны из детонирующего объе-

ма время ее действия возрастает вдвое. Далее, в области расстояний $R^0 > 0,1$ измеренные величины τ_+ для всех детонирующих смесей практически не различаются. Зависимость τ_+ от расстояния R и энергии смеси E представляется в виде

$$\tau_+ = 0,35 \cdot R^{1/2} \cdot E^{1/6}; \quad R/E^{1/3} > 0,1. \quad (14)$$

4. По фоторегистрациям расширения продуктов взрыва и по временам прихода фронта волны из осциллограмм давление — время построена зависимость $R^0 - t^0$ (расстояние — время) детонационного взрыва газовой смеси (рис. 8). Интенсивность второй ударной волны показана

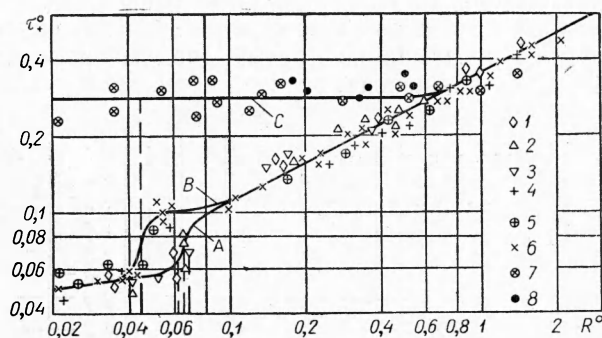


Рис. 7. Зависимость времени действия волны от расстояния.

1 — детонация смеси C_2H_2 +воздух; 2 — детонация смеси C_3H_8 +воздух; 3 — детонация смеси CH_4 +воздух; 4 — детонация смеси C_2H_6 + $5O_2$; 5 — инициирование горения смеси C_2H_6 + $5O_2$ пережиганием проволоочки; 6 — детонация смеси CH_4 + $2O_2$; 7 — инициирование горения смеси CH_4 + $2O_2$ пережиганием проволоочки.

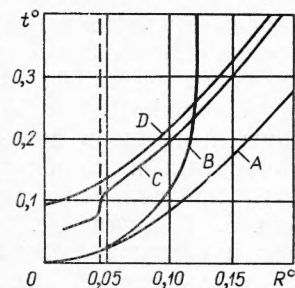


Рис. 8. Зависимость $R^0 - t^0$ ударной волны и продуктов взрыва при сферической детонации.

A — движение фронта ударной волны; B — расширение продуктов реакции; C — движение конца фазы сжатия; D — движение второй ударной волны.

кривой D на рис. 5. Величина максимального расширения продуктов реакции более точно измерена по снимкам сферических объемов до и после взрыва (рис. 9). В последнем случае снимок получается фотоаппаратом с открытым затвором. Измерения конечного объема расширившихся продуктов реакции при детонации топливно-кислородных смесей показали, что он превышает начальный в среднем в 19,6 раза. Для максимального радиуса расширения продуктов взрыва r_m получено

$$r_m/r_0 = 2,7 \pm 0,1. \quad (15)$$

По степени расширения произведена оценка работы A , которую совершают продукты взрыва при детонации топливно-кислородной смеси

$$A = \int_{V_0}^{V_k} p dV, \quad (16)$$

где V_k — объем продуктов в конце расширения.

Продукты взрыва считаем идеальным газом, а процесс их расширения адиабатическим. Начальную энергию газового объема представим в виде

$$E = \frac{p_0 V_0}{k-1}. \quad (17)$$

Изменение давления продуктов взрыва при их расширении можно аппроксимировать зависимостью

$$p = p_n \left(\frac{V_0}{V_k} \right)^k, \quad (18)$$

тогда отношение работы расширения продуктов взрыва A к начальной энергии E равно

$$\frac{A}{E} = 1 - \left(\frac{r_0}{r_m} \right)^{3(k-1)}. \quad (19)$$

Беря степень расширения из эксперимента и принимая $k=1,25$, получим $A/E=0,53$. Таким образом, для топливно-кислородной смеси показано, что только около 50% энергии взрыва совершает работу над окружающим воздухом, другая половина выделившейся энергии остается в продуктах реакции.

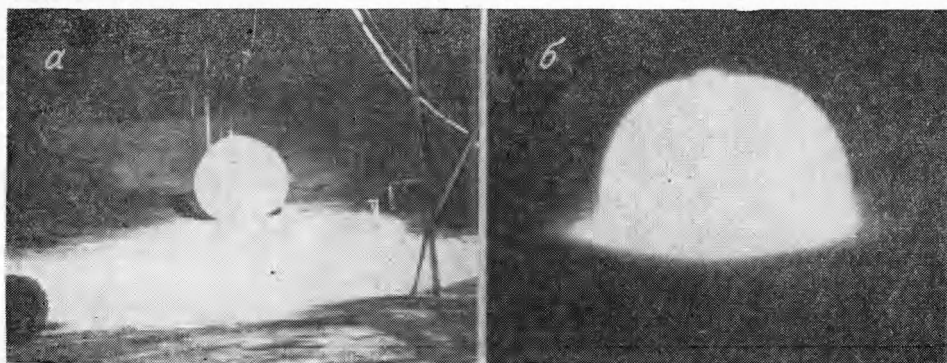


Рис. 9. Фото сферического объема смеси CH_4+2O_2 ($V_0=9,6 \text{ м}^3$; $r_0=1,3 \text{ м}$).
а — до взрыва; б — после детонационного взрыва.

Горение газовых смесей в сферических объемах. При зажигании в центре объемов пропано-воздушных и метано-воздушных смесей происходило медленное распространение пламени со скоростями порядка $1-10 \text{ м/сек}$. На осциллограммах пьезодатчиков, стоящих внутри объемов, отклонение от нулевых линий не наблюдалось. Поэтому можно считать, что амплитуда волн там менее $0,05 \text{ кг/см}^2$. (Величина $0,05 \text{ кг/см}^2$ соответствует отклонению луча на пленке $0,2 \text{ мм}$.) В окружающей атмосфере амплитуды волн не превышали $0,01 \text{ кг/см}^2$, так как в многочисленных опытах не срабатывали пусковые датчики, имеющие такой порог чувствительности.

Наиболее энергично сгорала ацетилено-воздушная смесь. В этом случае при сгорании объемов до 10 м^3 , как внутри объемов, так и в окружающей атмосфере, зарегистрировано образование волн с плавным нарастанием давления. Результаты измерений амплитуды волн, образующихся при горении топливно-воздушных смесей, представлены в табл. 4.

При зажигании сферических объемов топливно-кислородных смесей сгорание происходило с образованием ударных волн значительной интенсивности. При горении смеси состава CH_4+2O_2 наблюдалось ускорение сферического фронта пламени, а в смеси $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ крайне быстро происходил переход горения в детонацию.

Таблица 4

Состав смеси	$V_0, \text{ м}^3$	$\Delta p, \text{ кг/см}^2$	$\Delta p_2, \text{ кг/см}^2$	$\Delta p_s, \text{ кг/см}^2$
$\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5\text{O}_2 + 9,4 \text{ N}_2$	10	0,08	0,05	0,14
$\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 + 18,8 \text{ N}_2$	15	$< 0,05$	$< 0,01$	0,13
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 + 7,52 \text{ N}_2$	15	$< 0,05$	$< 0,01$	0,12

Примечание. Δp — амплитуда волн внутри объемов; Δp_2 — амплитуда волн на расстоянии около $10 r_0$; Δp_s — амплитуда ударных волн на расстоянии $10 r_0$ при детонации смесей.

Фоторегистрация процесса распространения сферического фронта пламени в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ представлена на рис. 10. На снимке видно ускоряющееся движение фронта пламени. При приближении пламени к периферии объема наблюдается растяжение эластичной оболочки, содержащей газовую смесь. Растяжение стенок оболочки происходит медленнее распространения пламени. Измерения показали, что конечный

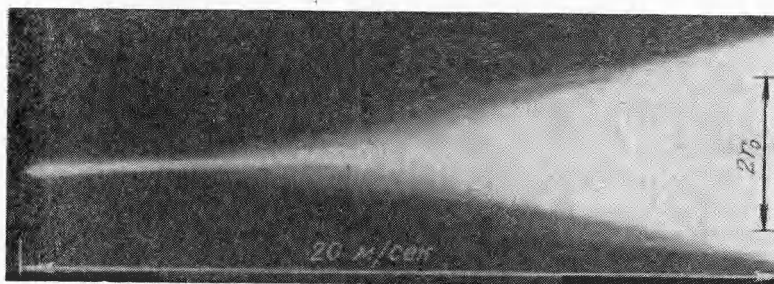


Рис. 10. Ускорение сферического пламени в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ ($V_0 = 5 \text{ м}^3$; $r_0 = 1,05 \text{ м}$). $2r_0$ — начальный диаметр объема.

объем продуктов горения превосходит начальный в среднем в 15 раз, т. е. $r_m/r_0 = 2,5$. Величина скорости фронта пламени достигает максимального значения около 200 м/сек через 18 мксек с момента зажигания. Радиус объема к этому времени увеличивается до $1,6 r_0$.

Осциллограммы записей давление — время при таком режиме горения смеси внутри и вблизи сферического объема показаны на рис. 11. По мере распространения волна сжатия с плавным нарастанием давления формируется в ударную волну. В области расстояний $R > 20 r_0$ распространяется только ударная волна с резким фронтом. Результаты

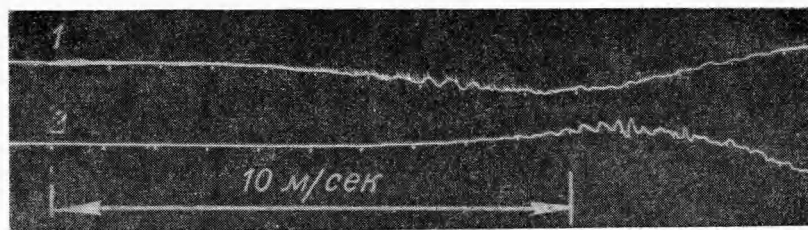


Рис. 11. Осциллограммы давление — время при ускоренном распространении сферического фронта пламени.

1 — внутри объема, $\Delta p = 0,95 \text{ кг/см}^2$; 2 — вблизи объема, $\Delta p = 0,7 \text{ кг/см}^2$.

измерений максимального давления, импульса и времени действия волны, образующейся при ускоренном распространении сферического пламени в объемах размером от 0,5 до 5 м³, представлены соответственно кривыми 3 на графиках рис. 5, 6, 7. Видно, что величины давлений и импульсов значительно ниже, чем в случае сферической детонации смеси (кривые 2). На расстоянии $R^0 = 0,07-0,075$ наблюдаются максимальные значения величин давлений и импульсов. Это расстояние соответствует в среднем $1,6r_0$ и совпадает с расстоянием, на котором наблюдается максимальное значение скорости фронта пламени. По-видимому, фронт пламени как поршень образует волну сжатия, причем интенсивность волны соответствует наблюдаемой скорости фронта пламени. При ускоренном распространении пламени образуется волна сжатия с временем действия значительно большим, чем при детонации. Однако увеличения с расстоянием не происходит, и на расстоянии свыше $20r_0$ величины t_+ смыкаются с результатами измерений при детонации.

При увеличении сжигаемых объемов смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ до 10—15 м³ было отмечено возрастание параметров волны в окружающей атмосфере (см. рис. 5, 8; 6, 8; 7, 8). Очевидно, возрастание параметров волны при увеличении начального объема смеси обусловлено достижением большей скорости фронта пламени в связи с увеличением пути его распространения.

О переходе горения в детонацию в сферическом объеме при слабом центральном источнике зажигания. Известно, что при горении любой топливно-кислородной смеси в трубах происходит переход горения в детонацию. В этом случае перед фронтом пламени движется исходная смесь, которая турбулизуется стенками трубы, что приводит к увеличению поверхности горения, т. е., в конечном счете, к непрерывному ускорению фронта пламени. Ускоряющееся пламя образует перед собой ударную волну, которая при достижении соответствующих параметров возбуждает детонацию несгоревшей смеси.

При распространении сферического пламени нет трения о стенки, поэтому такой вид турбулизации несгоревшей смеси в этом случае отсутствует. Однако и в этом случае наблюдается ускорение пламени. Так, в смеси метана с кислородом происходит непрерывное ускорение пламени (см. рис. 10). Вероятно, это связано с неустойчивостью гладкого сферического пламени при значении $Re \sim 10^6-10^7$. За счет мелких искривлений фронта пламени происходит увеличение поверхности сгорания, т. е. автотурбулизация смеси, что приводит к увеличению массовой скорости сгорания и, в конечном счете, к непрерывному ускорению пламени. В смеси метана с кислородом была зарегистрирована максимальная скорость пламени ~ 200 м/сек. Перехода горения в детонацию не наблюдалось.

В пропано-кислородной смеси при значительно меньших объемах ($V_0 = 1$ м³) также наблюдалось ускорение пламени, которое, однако, привело к образованию впереди пламени сферической ударной волны необходимой амплитуды, и горение перешло в сферическую детонацию оставшейся непрореагировавшей смеси. Отметим, что переход горения в детонацию произошел через $\sim 1,5 \cdot 10^{-3}$ сек от момента зажигания при прохождении пламенем расстояния в 0,2 м, т. е. прореагировало небольшое количество исходной смеси, примерно 0,3%. Это подтверждается сравнением параметров ударных волн в окружающей атмосфере для одинаковых объемов исходной смеси при инициировании их в одном случае плоской детонационной волной (сферическая детонация) и в другом пережиганием проволоки (переход горения в сферическую детонацию). Параметры волн оказались равными (см. рис. 5, 7). Измерен-

ная по фоторегистрации скорость распространения сферической детонационной волны равна 2300 м/сек. Более легкий переход горения в детонацию в пропано-кислородной смеси, по сравнению с метано-кислородной, связан с реакционно-кинетическими свойствами смеси. Действительно, критический диаметр плоской детонационной волны, вызывающей сферическую детонацию смеси в объеме, для пропано-кислородной смеси равен 10 мм, а для метано-кислородной смеси 32 мм [1]. Из приведенных сопоставлений характера горения пропано-кислородной и метано-кислородной смесей можно предполагать, что ввиду обнаруженного ускорения сферического фронта пламени в метано-кислородной смеси в ней должен наблюдаться переход горения в сферическую детонацию, но при значительно большем объеме смеси.

При исследовании горения топливно-воздушных смесей практически не обнаружено образования заметных волн в окружающей атмосфере. В данных экспериментах (объем смеси до 15 м³, отсутствие препятствий на пути пламени) не было заметного ускорения пламени. В условиях больших объемов и наличия на пути пламени препятствий, облегчающих турбулизацию исходной смеси, может возникнуть заметное ускорение фронта горения, и тогда возможно образование взрывных волн в окружающей атмосфере.

Поступила в редакцию
11/II 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Семенов. ЖТФ, 1956, XXXVI, 8.
2. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения, М., Изд-во АН СССР, 1963.
3. С. М. Когарко. Изв. АН СССР, ОХН, 1956, 4.
4. А. И. Соколик, А. И. Станиславский. Двухканальный пьезоэлектрический измеритель давления ПИД-9. Бюлл. Передовой научно-технической и производственной опыт. Изд. филиала ВИНТИ, 1957, № П-57-29/8.
5. М. П. Вукалович и др. Термодинамические свойства газов. Машгиз, 1953.
6. W. Döring, G. Schön. Z. f. Electroch., 1950, 54, 4.
7. N. Manson, F. Ferrie. Contribution the Study of spherical Detonation Waves. 4-th Symposium (international) on Combustion (Combustion and Detonation Waves), 1953.
8. М. А. Садовский. Сб. «Физика взрыва», 1952, 1.