

УДК 534.222.2

**ГАШЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ И ОСОБЕННОСТИ
ЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ В УЗКИХ КАНАЛАХ**

*B. F. Заказнов, A. I. Розловский, I. I. Стрижевский
(Москва)*

ВОЗМОЖНОСТЬ ГАШЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ В УЗКИХ КАНАЛАХ

При изучении закономерностей гашения дефлаграционного (нормального) горения в огнепреградителях с узкими каналами [1] установлено, что в соответствии с требованиями теории Я. Б. Зельдовича [2, 3], на пределе гашения пламени достигается фиксированное значение критерия Пекле (Pe); построенное из величины нормальной скорости пламени u_n и диаметра пламегасящих каналов d критическое значение $Pe_{kp} \approx 65$, в широком диапазоне изменения u_n , d и давления p . Для использования огнепреградителей важно знать закономерности гашения детонации ввиду особой опасности, которую представляет этот режим горения. Высказывались оказавшиеся ошибочными предположения, что огнепреградители здесь вообще неэффективны.

Как видно из табл. 1, концентрационные пределы распространения детонации уже пределов распространения нормального горения. Известно также, что концентрационные пределы детонации еще уже для труб

Таблица 1

Концентрационные пределы (в мол. % горючего) распространения детонации [4]
и дефлаграции [5] при 1 ата и комнатной температуре

Горючая смесь	Дефлаграция	Детонация	Горючая смесь	Дефлаграция	Детонация
$H_2 + O_2$	4,0—94	20—90	$C_3H_8 + O_2$	2,3—55	3,2—3,7
$H_2 + \text{воздух}$	4,0—75	18,2—58,9	$C_4H_{10} + O_2$	1,8—48	2,9—31,3
$CO + O_2$ (влажная)	15,5—94	38—90	$NH_3 + O_2$	15—79	25,4—75,4
$C_2H_4 + \text{воздух}$	3,1—32	5,5—11,5	$(C_2H_5)_2O + O_2$	2,0—82	2,7—40

диаметром 10—20 мм [6]. Для таких условий значения u_n (кроме смесей подkritического состава) еще практически не зависят от гасящего влияния стенок.

О. А. Цуханова [7] наблюдала гашение как детонационного, так и дефлаграционного горения водородо-кислородных смесей (от 14 до 81% H_2) в прямых капиллярах диаметром 0,25—0,7 мм и длиной 36—150 мм, соединяющих две камеры — инициирования детонации и контрольную. Заметим, что, судя по приводимым ею схемам фотопре-

гистраций, при проскоке пламени через капилляр в контрольной камере возникает дефлаграционное горение и в том случае, если в капилляр входила детонационная волна.

И. И. Стрижевский и Д. И. Тесменицкий [8] установили, что распространение детонации в смеси $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ может быть задержано с помощью металлокерамических фильтров. В более раннем исследовании [9] по определению пределов гашения пламени металлокерамическими фильтрами горение, по-видимому, было также детонационным.

Прекращение детонационного распада ацетилена в трубках диаметром 10 мм и при давлении около 10 ата наблюдал Реппе [10]. Он же рекомендовал для гашения пламени распада C_2H_2 насадки из колец Рашига. Гашение как дефлаграционного, так и детонационного распада ацетилена насадками из крупных (до 50 мм) колец Рашига наблюдали также Шмидт и Габерл [6, 11].

ПРЕДЕЛЫ ГАШЕНИЯ ПРИ ДЕТОНАЦИОННОМ СГОРАНИИ

В настоящей работе определялись условия гашения пламени при детонационном сгорании следующих смесей: 30% $\text{H}_2 + 70\%$ воздуха, $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{O}_2$. Опыты проводились на двух однотипных установках, в которых детонационный режим горения возникал при ускорении пламени в длинной трубе [4]. Трубы брались диаметром 40 и 25 мм, длиной 7 и 4,2 м соответственно (установки I и II). Смеси, исследовавшиеся на установке I, составлялись в потоке втекающих в трубу компонентов. Труба установки II перед опытом эвакуировалась и затем заполнялась смесью, предварительно составленной в смесителе высокого давления.

Смесь поджигалась у одного из торцов трубы. Второй конец трубы разветвлялся и в одной из ветвей, основной, размещался патрон с огнепреградителем, за которым имелось окно, закрытое пластиной из плексигласа для визуального наблюдения. Другая ветвь, контрольная, предназначалась для регистрации факта детонационного сгорания и измерения давления в детонационной волне, распространяющейся в широкой трубе. В ее торце находился крещерный манометр, установка II имела крещерный манометр и в другой ветви. Ввиду тождественности условий горения в обеих ветвях возникновение детонации в одной из них свидетельствует об аналогичном характере горения и в другой. Опыты со смесями H_2 проводились в трубе I, с остальными смесями — в трубе II (табл. 2).

Величина Re_{kp} в табл. 2 построена из значений u_n и p_{kp} , характеризующих начальную скорость горения и исходное состояние горючей системы до возникновения детонации. При этом не принимается во внимание рост давления в детонационной волне и много большая суммарная скорость перемещения зоны горения. Как известно, скорость детонации D является термодинамической величиной и не характеризует кинетику реакции в отличие от u_n . Величина u_n зависит от кинетики при температуре горения T_b и $p = \text{const}$, тогда как в детонационной волне реакция идет при давлении, во много раз большем начального, и при температуре, развивающейся во фронте волны. Тем не менее, Re_{kp} совпадают с таковыми для опытов, в которых детонация не возникала.

Аналогичную закономерность можно проследить и на данных других исследований. Для опытов [8] со смесями $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ можно вычислить $\text{Re}_{kp} > 41$; давление в этих опытах было несколько ниже предельного. В большой серии опытов [7] среднее значение $\text{Re}_{kp} = 30 - 40$ при двух-

Таблица 2

Условия гашения пламени металлокерамическими огнепреградителями при детонационном режиме горения

Горючая смесь	Число опытов		ρ_{kp} , ата	P_{kp}	δ , мм	ρ_1 , ата	η
	проскок	задержание					
30% H_2 +70% воздух	—	3 2	>2,0	>25	0,21 0,21	1,3—1,7 2,0	31—40 30
$2H_2+O_2$	—	2	1,8	55	0,21	1,0	50
	—	2			0,21	1,5	55
	1	—			0,21	2,0	60
CH_4+2O_2	—	3	2,5	74	0,13	2,0	47—51
	—	—			0,13	3,0	52—55
$C_2H_2+2O_2$	—	3	1,3	54	0,05	1,0	49—52
	3	—			0,05	1,5	46—50
	—	3			0,03	1,0	48—53
	3	—		69	0,06	1,5	47—52

П р и м е ч а н и е. p_0 — начальное давление; ρ_{kp} — критическое давление; η — относительный максимальный рост давления в контрольной трубе (по показаниям датчика давления).

кратном (в обе стороны) разбросе, длина канала практически не влияет на пределы гашения¹.

Можно констатировать, что в случае детонационного сгорания задержание пламени происходит при тех же начальных условиях, что и для дефлаграции. Гашение происходит так, как если бы никаких изменений горючей системы при переходе от нормального горения к детонации не происходило. Такой же вывод следует из соотношения концентрационных пределов распространения дефлаграции и детонации.

Очевидно, что при входжении в огнепреградитель детонационная волна разрушается, давление уменьшается до величины, близкой к начальной, после чего образовавшееся нормальное пламя гасится по известному механизму. Вырождение детонационной волны в дефлаграцию, по-видимому, не сопровождается сколько-нибудь заметной задержкой, поскольку осуществляется на достаточно коротком участке пути: в металлокерамических пластинах — уже при толщине в 5 мм.

Опыты Реппе по гашению пламени распада ацетилена также подтверждают такую трактовку гашения детонации. В определенном диапазоне давлений детонационное горение в узких трубах переходило в дефлаграцию. При еще меньшем давлении пламя гасло. При p , большем верхней границы указанного диапазона, был возможен проскок детонации.

ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ В ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЕ ДЛЯ УЗКИХ КАНАЛОВ

При распространении детонационной волны в достаточно узких каналах возможны заметные потери энергии и количества движения, обусловленные теплоотдачей из зоны реакции в стенки трубы и трением газа о стенки. Потери приводят к снижению скорости детонации, а при

¹ Было отмечено [12], что к моменту входжения пламени в гасящий канал давление успевало несколько возрасти.

определенном их значении — к разрушению детонационной волны [4]. Потери возрастают с уменьшением диаметра канала, детонация становится невозможной при определенном критическом диаметре δ_D , при этом $\delta_D > \delta_{kp}$ для дефлаграции.

Значения δ_D для различных смесей $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ измерили Пуш и Вагнер [13], фотографируя распространение детонационной волны в пучках прозрачных труб различного диаметра, одновременно заполнявшихся исследуемой смесью. Для стехиометрической смеси $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ $\delta_D = 1,5$; величина δ_{kp} , по нашим данным, меньше в 4 раза.

В гладких трубах возможно лишь незначительное уменьшение скорости детонации, не превышающее $\frac{RT}{A} D$, где A — энергия активации реакции [4]. Экспериментальная проверка также позволяет установить лишь слабую зависимость скорости детонации (D) от диаметра трубы.

Так, по Кистяковскому и сотр. [14, 15], уменьшение δ от 100 до 12 мм понижает D различных смесей $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$ до 7% его значения. В менее точных измерениях Баумана [16] при $\delta=51-3$ мм изменения D смеси $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ лежали в пределах ошибки опыта. Генош [17] не наблюдал снижения D смеси 52% $\text{C}_2\text{H}_2 + 48\%$ O_2 вплоть до $\delta=1,1$ мм.

Мансон [18] дал теорию пределов детонации в узких каналах и вычислил, что для ряда кислородных смесей ацетилена и пропана при 1 ата δ_D имеет значение порядка нескольких сотых долей миллиметра¹. Пересчет данных [1] дает для смесей $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$ (9—45% C_2H_2) $\delta_{kp} = -0,40-0,08$ мм, для смесей пропана, близких к стехиометрической, $\delta_{kp} \approx \approx 0,3$ мм, т. е. много больше указанных Мансоном предельных значений δ_D .

Наблюдалось сгорание смесей $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ и 50% $\text{C}_2\text{H}_2 + 50\%$ O_2 в трубах диаметром до 0,85 мм с постоянными скоростями, не зависящими от диаметра, близкими к D в пределах погрешности опыта, правда, весьма значительной ($\sim 15\% D$)². Генош [17] установил факт распространения детонации в смесях $\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2$ вплоть до капилляров с $\delta = -0,3$ мм. Все изложенное подтверждает возможность устойчивой детонации быстрогорящих кислородных смесей в каналах диаметром в несколько десятых миллиметра.

Поскольку скорость детонации заметно не понижается даже в трубах подкритического диаметра, представлялось интересным выяснить неизученный вопрос об изменении давления в детонационной волне в узких каналах. Такие опыты проводились на описанной выше установке II. Детонация распространялась как в прямых и гладких трубах, так и в извилистых каналах, образованных гранулами насадки. Были использованы: а) насадки из шаров диаметром $d=2$ и 4 мм ($\delta=0,7$ и 1,4 мм, как и ранее [1], принимаем $\delta=0,36 d$) при высоте слоя насадки 200 мм; б) трубы длиной 270 мм, диаметром от 2 до 7 мм как единичные, так и собранные в пучок. Давление измерялось крещерным манометром, поверхность поршня которого находилась на расстоянии 20 мм от конца гасящей трубы или кромки насадки³ (табл. 3).

¹ Для смеси $\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{O}_2$ приводится непонятный результат $\delta_D = 0$. Ссылка на подтверждение расчетов экспериментальными данными [14, 15] не соответствует содержанию этих работ.

² Заметим, что в наших опытах со смесями $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ зафиксирована детонация при δ , почти вдвое меньших, чем в опытах [13].

³ Было установлено, что при увеличении этого расстояния до 250 мм рост давления в обеих ветвях трубы становился одинаковым. Детонационная волна трансформировалась в обычную для широкой трубы и уже не отличалась описываемыми ниже особенностями, присущими узким каналам.

В серии опытов крещерный манометр заменялся аналогично размещавшимся пьезокварцевым датчиком давления, который отделялся от свободной части трубы пучком трубок с $\delta=3,0$ мм и высотой 400 мм. В контрольных опытах вся труба была пустой. Для смеси $C_2H_2+2O_2$ при $p_0=1$ ата рост давления за насадкой составлял 16,5—18; в контрольных опытах $\eta_2=50—60$.

Эти результаты мало отличаются от полученных с помощью крещерного манометра, что подтверждает надежность его показаний.

На рисунке данные табл. 3 представлены в виде зависимости отношения роста давления в контрольной и рабочих трубах η_1/η_2 от логарифма унифицированного критерия распространения пламени. Таким критерием будем считать отношение $\varphi = \delta/\delta_{kp}(p_0)$, где $\delta_{kp}(p_0)$ — критический диаметр для распространения дефлаграции при давлении p_0 . Результаты нескольких опытов усреднялись для аналогичных условий, их число обозначено на графике возле соответствующих точек. На графике приведены также данные опытов со смесью CH_4+2O_2 (трубка $\delta=2$ мм, $p_0=2,5—3,0$ ата).

Несмотря на значительный разброс результатов, зависимость $(\eta_1/\eta_2) - \lg \varphi$ действительно в самом грубом приближении можно считать единой для различных начальных давлений, горючих смесей, а также как для гладких трубок, так и извилистых каналов. При $\varphi \approx 10$ рост давления в контрольной трубе в 2,5—3 раза больше, чем в рабочей; η_2 мало отличается от η_1 лишь для $\varphi > 100$.

Как известно, в детонационной волне

$$p - p_0 = D^2 (V_0 - V) / V_0^2,$$

где p и V — давление и удельный объем сжатого газа, p_0 и V_0 — то же, в исходном состоянии. Принимая для грубой оценки $V_0 - V \approx V_0$ и пре-небрегая при этомискажающей ролью механических потерь (в отноше-нии уравнения сохранения количест-ва движения) найдем, что рост дав-ления в детонационной волне

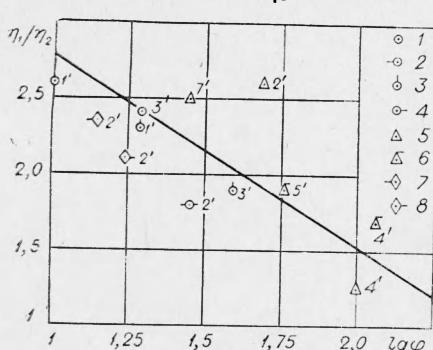
$$p - p_0 = D^2 / V_0,$$

т. е. пропорционален квадрату ско-рости детонации.

Таблица 3
Изменение давления при детонации смеси $C_2H_2+2O_2$

диаметр	Шары			Трубы			
	p_0 , ата	η_1	η_2	диаметр	p_0 , ата	η_1	η_2
2	1,0	36	14	2	1,0 (7)	40—50	16—21
	2,0	41	18		1,7 (2)	46;49	18;19
	3,0	48	27		2,0 (3)	43—57	21—25
4	1,0 (3)	36—39	14—18		2,0 (2)	55	34;42
	1,5	4	24	4	1,0 (2)	63;66	20;21
	2,0 (2)	46;51	23;26		2,0 (4)	45—72	25—30
	2,0	74	44	7	1,0 (4)	50—58	40—45

Примечание. η_1 — рост давления в контрольной ветви установки; η_2 — рост давления за исследуемыми каналами. Числа в скобках означают количество опытов с тождественными результатами.



Снижение давления в детонационной волне для узких каналов.

1, 2, 3, 4 — $C_2H_2+2O_2$, насадки из шаров, $p=1$; 1,5; 2,0 и 3,0 ата соответственно
5, 6 — $C_2H_2+2O_2$, пучок трубок, $p=1,0$ и 2,0 ата соответственно; 7, 8 — CH_4+2O_2 , опыты с единичными капиллярами, $p=2,5$ и 3,0 ата соответственно.

Однако опыт свидетельствует, что величина D мало изменяется даже в каналах подкритического диаметра. Это позволяет заключить, что наблюдаемое понижение давления связано не с изменением скорости детонации и относится не к падающей, а к отраженной ударной волне. Распространение детонации в узких каналах сопровождается перестройкой зоны реакции за фронтом ударной волны, значительно сокращающей вторичный рост давления при отражении волны от нормальной направлению ее движения поверхности датчика давления. Хотя закономерности такого изменения структуры зоны реакции еще неясны, само установление этого эффекта представляет существенный практический интерес. Разрушающее действие детонации всегда определяется свойствами отраженной, а не падающей волны. Учитывая возможность значительного снижения давления, можно существенно облегчить разумный выбор конструкции для детонационноопасной аппаратуры,ющей прочности без ее излишнего утяжеления.

ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ В НАСАДКАХ

В серии опытов исследовались закономерности роста давления при горении в цилиндрической бомбе высотой 650 мм и диаметром 61 мм, частично или полностью заполнявшейся насадкой из шаров с $d=9,5$ мм. Сгорание в такой среде должно приводить к сильной турбулизации пламени, благоприятствующей возникновению детонации (в смесях, способных к детонации) [19, 20]. Смесь поджигалась у нижнего конца, у верхнего торца закреплялся крещерный манометр. Результаты опытов представлены в табл. 4. При сгорании недетонирующей (в этих условиях) метано-воздушной смеси в пустой бомбе рост давления близок к термодинамическому. В бомбе, заполненной насадкой, рост давления

Таблица 4
Рост давления при сгорании в бомбе, заполненной насадкой

Горючая система	μ					
	0		0,5		1,0	
	$p_0, \text{ ат} \alpha$	η	$p_0, \text{ ат} \alpha$	η	$p_0, \text{ ат} \alpha$	η
9,5% CH ₄ +90,5% воздуха	5,0	6,0	—	—	10—15	1,0 (3)
	10,0	8,0 (2)	—	—	20	1,2
	—	—	—	—	28	1,4
2H ₂ +O ₂	1,0	55,71	1,0	19	1,0	1,0 (2)
	2,0	64	2,0	20	2,0	5,0
	—	—	3,0	25	3,0	7,7; 8,3 (2)
CH ₄ +2O ₂	1,0	266; 277; 408	1,0	38; 45 (2)	1,0	9
	—	—	—	—	3,0	16
	—	—	—	—	4,0	16
C ₂ H ₂ +2O ₂	—	—	—	—	1,0	1,0
	—	—	—	—	2,0	15,0
	—	—	—	—	3,0	19,0
Распад C ₂ H ₂	—	—	—	—	4,0	23,0
	—	—	—	—	10,0	50

Примечание. μ — доля высоты бомбы, заполненной насадкой.

такой медленногорящей смеси, благодаря интенсивной теплоотдаче, не превышает 1,5 раза даже при начальном давлении до 30 ата. Сгорание стехиометрической водородно-кислородной смеси в пустой бомбе при $p_0=1$ ата приводит к образованию детонации, однако в бомбе, заполненной насадкой, при $p_0 \leq 3$ ата давление возрастает не более чем в 8 раз. Сгорание смеси CH_4+2O_2 в пустой бомбе приводит к росту давления в 250—400 раз, обычно наблюдаемым только у концентрационных пределов детонации [21]. В наполовину заполненной бомбе рост давления характерен для обычной детонации; для $\mu=1$ даже при 4 ата рост давления не превосходил 16.

Таким образом, при $p_0=3$ —4 ата в насадках, соответствующих эффективной $\delta=3,4$ мм, не наблюдался характерный для детонации рост давления. В этом случае диаметр каналов больше критического при дефлаграции до 35—40 раз для смесей $2\text{H}_2+\text{O}_2$ и CH_4+2O_2 и до 100—130 раз для смеси $\text{C}_2\text{H}_2+2\text{O}_2$. В этих опытах еще явственнее оказывается угнетающее действие стенок на ударные эффекты при быстром сгорании. В то же время взрывной распад ацетилена в такой же насадке при $p_0=10$ ата приводил к 50-кратному росту давления. Для такой системы $\delta_{kp}=0,87$ мм [22], т. е. всего в 4 раза меньше δ каналов данной насадки.

ВЫВОДЫ

1. Изучено гашение детонации смесей 30% $\text{H}_2+70\%$ воздуха, $2\text{H}_2+\text{O}_2$, CH_4+2O_2 и $\text{C}_2\text{H}_2+2\text{O}_2$ в узких каналах. Установлено, что гашение происходило при тех же значениях начального (до возникновения детонации) давления и скорости пламени, что и при дефлаграции. Переход нормального горения в детонацию не влияет на возможность гашения пламени.

2. Установлено, что при прохождении детонационной волны по быстрогорящим смесям C_2H_2 и CH_4 с O_2 через каналы с диаметром, много большим критического и для гашения пламени и для разрушения детонационной волны, давление снижается в 2—3 раза. При этом потери еще незначительно снижают скорость детонации; падение давления связано с изменением зоны реакции и ослаблением отраженной волны. Эта особенность может быть использована при конструировании детонационноопасной аппаратуры.

3. При сгорании сильновзрывчатых газовых смесей в насадках с каналами, в десятки раз большими критического для гашения пламени, рост давления не превосходит 15—20 раз.

Поступила в редакцию
5/XI 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Ф. Заказнов, А. И. Розловский, И. И. Стрижевский. Инж. ж. АН СССР, 1963, 3, 280.
2. Я. Б. Зельдович. ЖЭТФ, 1941, 11, 159.
3. Я. Б. Зельдович. Теория горения и детонации газов. Изд. АН СССР, 1944.
4. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации, ГТТИ, 1955.
5. H. F. Coward, G. W. Jones. Limits of Flammability of Gases and Vapors, U. S. Bureau of Mines, Bull. 503, Washington, 1952.
6. А. С. Соколик. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах, Изд. АН СССР, 1960.

7. О. А. Цуханова. Сб. «Третье всесоюзное совещание по теории горения». 1960, т. 1, 187.
8. И. И. Стрижевский, Д. И. Тесменицкий. Сварочное производство, 1961, № 9, 36.
9. A. C. Egerton, A. I. Everett, N. P. W. Mooge. IV Symposium on Combustion, 689, Baltimore, 1953.
10. W. Reppe. Сб. «Химия ацетилена», 52, ИИЛ, 1954.
11. H. Schmidt, K. Haberl. Zs. techn. Überwachungsvereins München. 7, 423, 1955.
12. А. И. Розловский, В. Ф. Заказнов, И. И. Стрижевский. ФГВ, 1966, 2, 109.
13. W. Pusch, H. H. Wagner. Combustion a. Flame, 1962, 6, 157.
14. G. B. Kistiakowsky, H. T. Knight, M. E. Malin. J. Chem. Phys. 1952, 20, 884.
15. G. B. Kistiakowsky, W. G. Zinnman. J. Chem. Phys., 1955, 23, 1889.
16. W. Baumann, Z. Elektrochemie, 1961, 65, 898.
17. H. Guenoche. Rev. Inst. Franc. Petrole, 1949, 4, 15.
18. N. Manson, Z. Elektrochemie, 1957, 61, 586.
19. К. И. Щелкин. ЖФХ, 1945, 19, 221.
20. К. И. Щелкин. ЖЭТФ, 1948, 10, 823.
21. С. М. Когарко, Я. Б. Зельдович. Докл. АН СССР, 1948, 53, 553.
22. В. Ф. Заказнов, И. И. Стрижевский. Химическая промышленность, 1965, 4, 285.