

9. Miller P. J., Carlson K. E. Determining JWL equation of state parameters using the Gurney equation approximation // 9th Symp. on Detonation, Portland, Oregon, USA. 1989.— Vol. 3.— P. 930.
10. Одинцов В. А. Расширение цилиндра с доньями под действием продуктов детонации // ФГВ.— 1991.— 27, № 1.— С. 100.

г. Дзержинск

Поступила в редакцию 1/XI 1991

УДК 536.46 + 662.3

*Б. Н. Кондриков, Ю. Д. Рябикин, С. П. Смирнов,
Л. К. Чекалина, Я. В. Алымова*

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ СЛОЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ВВ В ТРУБАХ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

Проведены опыты по переходу горения в детонацию свободно насыпанного слоя гексогена, октогена и тэна, а также смесей гексогена с концентрированной азотной кислотой и октогена с ацетоном в трубах длиной до 7 м и диаметром до 0,094 м. Проведен расчет и получено асимптотическое условие ПГД в виде предельной длины трубы, при которой скорость газового потока со взвешенными в нем горящими частицами ВВ устремляется в бесконечность. Определена величина критерия Рейнольдса на выходе из трубы при постоянной поверхности горения. Показано, что при $Re > 11500$ при достаточно большой толщине слоя ВВ переход происходит почти безотказно.

В работе [1] изучался переход горения в детонацию (ПГД) в стеклянных трубах небольшого диаметра (8—12 мм) и длины (до 300 мм), на внутренней поверхности которых находился скрепленный со стенками слой ВВ. Получены три детонационных режима: низкоскоростной (2—3 км/с), высокоскоростной (4—5 км/с) и сверхскоростной (>10 км/с). Теоретическое рассмотрение процесса позволило сформулировать дифференциальное уравнение, описывающее увеличение скорости потока газа, и получить простой, хорошо выполняющийся критерий ПГД. При воспламенении слоя порошкообразного ВВ, не скрепленного со стенкой, детонации не наблюдалось: порошок выдувался из трубы, процесс затухал.

В данной работе рассмотрен процесс ПГД свободно насыпанного слоя ВВ в трубах больших размеров — диаметром $d = 0,026 \div 0,094$ и длиной $l = 0,6 \div 7,1$ м (масса ВВ 0,1—14,5 кг). В этих условиях при определенных соотношениях между d и l трубы и площадью поперечного сечения канала, занятого ВВ, возникала детонация. Несмотря на существенные различия условий опытов, подход к построению критерия ПГД, реализованный в [1], оказалось возможным применить и в данном случае.

Методика проведения опытов

Для исследования взяты гексоген, октоген и тэн — стандартные технические продукты. В ряде опытов применялись смеси гексогена с концентрированной (98 %) азотной кислотой и октогена с ацетоном. Трубы стальные, бесшовные. Отношение толщины стенки к диаметру 0,05—0,1. Применялись также трубы из фторопласта ($d = 36 \div 66$ мм, $l = 1,0 \div 2,2$ м) со стенками толщиной 5—10 мм.

Открытую с обеих сторон трубу укладывали на стойки, помещали в нее некоторое количество порошкообразного ВВ и с помощью тефлонового шаблона в виде сегмента на длинном стержне разравнивали слой порошка в трубе, удаляя излишек через свободные торцы. Гексоген и октоген воспламеняли спиралью из нихромовой проволоки, нагреваемой электрическим током. В одних опытах она размещалась в торце заряда

вблизи одного из открытых концов трубы, в других — внутри трубы на расстоянии от $1/4$ до $1/2$ ее длины от торца. Для воспламенения тэна, который при атмосферном давлении горит неустойчиво [2], использовали подсыпку небольшого количества гексогена. Наблюдение за ходом процесса и покадровую съемку вели с помощью видеомонитора.

О результате опыта судили по степени дробления трубы. При детонации стальная труба обычно разрушалась полностью с образованием большого количества осколков. При неполной детонации (взрыве) был слышен сильный звук, труба раздувалась или разрушалась частично с образованием на разрушенном торце венчика металлических лепестков. В тефлоновых трубах детонации не происходило: был слышен громкий хлопок, труба деформировалась или разрывалась по образующей, образования и разброса осколков не наблюдалось.

Результаты опытов

Горение ВВ после включения электрического тока, нагревающего воспламенительную спираль, развивается вначале относительно спокойно: процесс идет внутри трубы, затем появляется дым, пламя. Форс пламени быстро растет, слышен нарастающий шум — ВВ взрывается. Труба разрушается, ее осколки разлетаются на расстояние до 100 м от места проведения опыта.

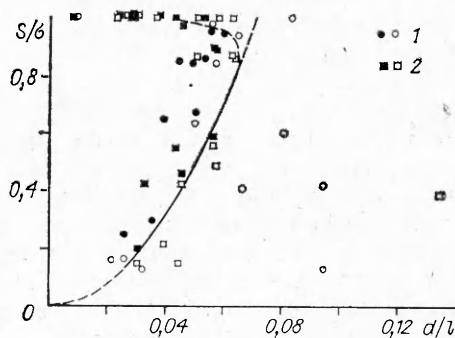
На рис. 1, 2 результаты опытов представлены в координатах d/l — S/σ , где $\sigma = \pi d^2/4$; S — площадь сегмента поперечного сечения слоя ВВ в трубе. Предполагалось, что при уменьшении d/l и увеличении S/σ вероятность возникновения взрыва возрастает. В первом случае затрудняется отток газов из трубы, во втором, по крайней мере формально, увеличивается плотность заряжения, растет максимально возможное давление взрыва. Кривая на рис. 1 отделяет область, в которой взрывы чередуются с отказами (взрывы преобладают), от пространства, где взрывов практически нет — за пределы области взрывов вышла только одна черная точка: $d = 0,046$, $l = 0,875$, $h = 0,026$ м (h — высота сегмента, занятого ВВ). Две полужерные точки отвечают процессу, в котором звук был сильным, но труба существенно не повреждена. Обе они попали непосредственно на граничную кривую.

В интервале $0,2 < S/\sigma < 0,85$ кривая представляет собой отрезок параболы $S/\sigma = 200 (d/l)^2$. Как и предполагалось, область взрывов при увеличении S/σ расширяется. При $1 > S/\sigma > 0,85$ судить о реальном расположении граничной кривой трудно — количество точек вблизи параболы и слева от нее мало, а справа их вообще нет. Два возможных варианта размещения кривой даны штриховыми линиями. При $S/\sigma = 1$ (16 точек) взрывы и отказы располагаются произвольным образом. Отношение d/l перестает влиять на результат. Очевидно, механизм ПГД при полном заполнении трубы совершенно иной, чем в трубе с зазором. Он изучался во многих работах и здесь не рассматривается.

Расположение воспламенителя, вообще говоря, довольно существенно. В области взрывов, ограниченной параболой, 7 светлых точек —

Рис. 1. Граница области взрывов гексогена в стальных трубах.

1 — опыты с воспламенением в торце; 2 — опыты с воспламенением в средней части заряда (темные точки — взрыв, светлые — отказ).



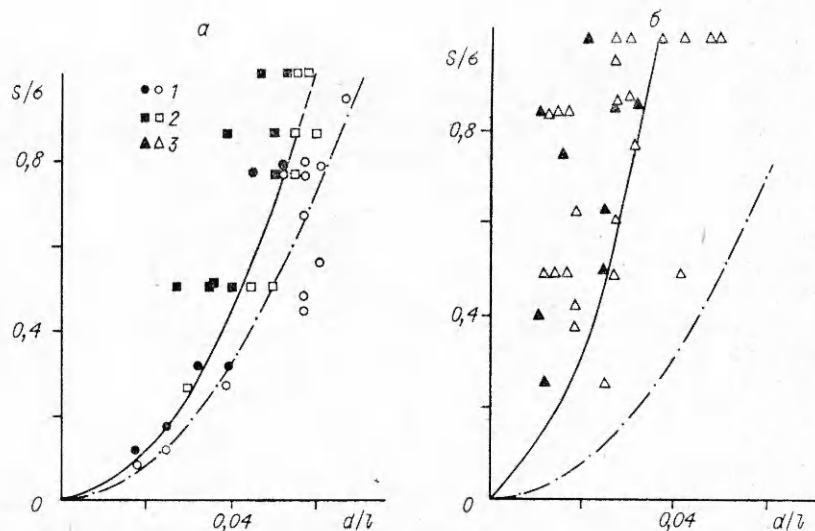


Рис. 2. Границы областей взрывов мелкодисперсного октогена (1), гексогена (2) и тэна (3).
1, 3 — стальные трубы; 2 — фторопластовые трубы.

6 кружков и 1 квадрат, тогда как число темных кружков и квадратов почти одинаково, соответственно 9 и 8. Хотя два светлых кружка находятся вблизи границы исследованной области условий при малых S/σ , а два — при больших, можно полагать, что вероятность отказов при расположении воспламеняющей спирали в торце трубы все же заметно больше, чем в середине.

Опыты в трубах из фторопласта (рис. 2, а), если не принимать во внимание, что в них не наблюдалось детонации (все темные точки обозначают взрыв), дали почти такую же картину, как в стальных, но граничная кривая $S/\sigma = 300 (d/l)^2$ располагается левее кривой, изображенной на рис. 1 (на рис. 2 она показана штрихпунктиром). Область взрывов во фторопластовой трубе более узкая. Любопытно, что она практически совпала с областью взрывов, полученной в опытах с мелкодисперсным октогеном в стальных трубах.

Обычный технический октоген детонирует хуже мелкодисперсного: граничная кривая ПГД располагается левее показанной на рис. 2, а, и число отказов слева от нее больше. Добавление 5% ацетона слабо повлияло на ПГД октогена. Добавление HNO_3 к гексогену несколько расширило область взрывов, при $S/\sigma = 0,40$ и $0,85$ взрывы возникали в области, в которой без HNO_3 получались отказы.

Тэн в условиях этих опытов «разгорается» долго и горит менее интенсивно, чем гексоген и октоген. ВВ плавится, расплав вытекает из трубы. Взрыв происходит, вероятно, в слое расплава. Зона в координатах $d/l - S/\sigma$, в пределах которой он наблюдается (рис. 2, б), очень узкая: $S/\sigma = 800 (d/l)^2$. Вероятность взрывов в ней составляет менее 40% (8 взрывов и 14 отказов).

Обсуждение результатов

Из результатов опытов можно заключить, что при поджигании свободно насыпанных слоев гексогена и октогена (данные для тэна менее надежны) в открытой с обеих сторон трубе при достижении определенных соотношений между размерами трубы и «плотностью заряжения» взрыв и детонация происходят с весьма высокой вероятностью: на рис. 1 в пределах области, ограниченной кривой $S/\sigma = 200 (d/l)^2$, вероятность составляет 0,7, на рис. 2, а левее кривой $S/\sigma = 300 (d/l)^2 - 1$ (точки при $S/\sigma = 1,0$ не рассматриваются).

Еще одно предварительное замечание состоит в том, что опыты в стальных трубах, где термин взрыв, как правило, обозначает детонацию, и в трубах из фторопласта, где детонации ни в одном случае не отмечено, дают близкие друг к другу кривые. Можно думать, что условия, приводящие к взрыву и к детонации, в сущности одни и те же. Наблюдаемую разницу в характере процесса следует приписать различию механических свойств, прочности стальных и тефлоновых труб: последние не обеспечивают необходимого для возникновения детонации развития ударно-волновых процессов.

Есть основания полагать, что ПГД свободно насыпанного слоя ВВ в трубе — явление достаточно закономерное и может рассматриваться с применением обычных соотношений химической газодинамики, аналогичных примененным ранее [1] для ПГД слоя, скрепленного со стенками трубы, где воспроизводимость результатов была гораздо лучше.

В работе [1] условие ПГД рассматривалось в основном как достижение такой длины заряда, при которой скорость потока газа с взвешенными в нем горящими частицами ВВ устремляется в бесконечность, т. е. в сущности, как условие возникновения взрыва. Конкретный механизм возникновения детонации не рассматривался.

Используем соотношения, полученные в [1]. Обозначим дополнительно $\sigma_{св} = \sigma - S$ — площадь поперечного сечения трубы, не занятого ВВ (свободное сечение); $A = 2V(d-h)h$ — поперечный размер поверхности слоя ВВ в трубе; h — высота слоя. Учтем, что в открытой с обоих концов трубе начало координат помещается в центре трубы, на равном расстоянии от ее концов. Точнее, на расстоянии $\pm x_0 = \sigma_{св} U_0 \rho_g / A u_m$ от центра трубы (U_0 — скорость потока газа, при которой время уноса частиц становится меньше времени их сгорания; ρ_g — плотность газа; u_m — массовая скорость горения ВВ). Во всех случаях $x_0 \ll l$, поэтому в дальнейшем это уточнение практически не используется.

Запишем уравнение изменения концентрации частиц n в газе за счет уноса их с поверхности слоя потоком газа, движущимся со скоростью U :

$$\sigma_{св} \frac{d(Un)}{dx} = Am(U), \quad (1)$$

где $m(U) = aU^\alpha$. Поскольку для свободно насыпанных порошков обычно $\alpha = 3$ [3], в дальнейшем используем это выражение в виде $m = aU^3$.

Аналогично [1] примем асимптотический подход — пренебрежем изменением плотности газа за счет повышения давления, поскольку на основном участке увеличения скорости потока до величины порядка нескольких сотен метров в секунду рост давления пренебрежимо мал (скорость звука в продуктах сгорания > 1000 м/с). Это облегчит получение асимптотического решения с использованием условия $U \rightarrow \infty$. Уравнение для изменения скорости потока газа за счет горения взвешенных в нем частиц при $|x| > |x_0|$, можно написать в виде

$$\rho_g \frac{dU}{dx} = \pi d_c^2 u_m n, \quad (2)$$

где d_c — диаметр частицы вещества. Дифференцируя (2) и подставляя результат в (1), получаем

$$U \frac{d^2 U}{dx^2} + \left[\frac{dU}{dx} \right]^2 - kU^3 = 0, \quad (3)$$

$$k = \frac{\pi a A d_c^2 u_m}{\sigma_{св} \rho_g}.$$

Решение (3) имеет вид $U = (U_0^{-1/2} - \sqrt{k/10x})^{-2}$ [1]. При $U \rightarrow \infty$ находим

$$x_* = l_*/2 = \sqrt{10/(kU)}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что комплекс

$$Y = (l_*/2) \sqrt{A/\sigma_{св}} = \sqrt{10\rho_r/(πad_ч^2u_mU_0)}, \quad (5)$$

при постоянных ρ_r , a , $d_ч$, u_m , U_0 есть величина постоянная.

Данные, полученные в опытах с гексогеном и смесью его с азотной кислотой, а также с мелкодисперсным октогеном, приведены на рис. 3, а. Кривая 1 отделяет взрыв от отказов. Число светлых точек над ней всего четыре, темных — 31. Средняя часть этой кривой при $0,2 < S/\sigma < 0,75$ действительно параллельна оси абсцисс: $Y = \text{const} = 9 \text{ м}^{1/2}$. Левая часть кривой при $S/\sigma < 0,2$ по мере уменьшения S/σ идет вверх: в случае малого количества ВВ в трубе взрыв затруднен. Правая часть кривой растет, по-видимому, в результате того, что при узких зазорах и малых значениях $\sigma_{св}$ велик унос ВВ в периоде разгорания и горения. В ходе уноса $\sigma_{св}$ увеличивается быстрее, чем A — реальное значение Y , при котором происходит взрыв, меньше, чем на граничной кривой при $S/\sigma > 0,75$. Какое количество вещества удаляется из трубы для достижения $Y = 9 \text{ м}^{1/2}$, можно оценить, исходя из простых геометрических соображений: при $S/\sigma = 0,95$ и $0,99$ получается ~ 20 и 40% соответственно.

Из рис. 3, а видно, однако, что значение $Y = 9 \text{ м}^{1/2}$ само по себе не является абсолютной границей, ниже которой ПГД невозможен. Имеются по крайней мере пять точек, отвечающих условиям, при которых была детонация, и расположенных ниже этого уровня. Кривая 1 в этом смысле представляет собой границу области, в пределах которой весьма маловероятен отказ, и с точки зрения технологической безопасности не слишком полезна: для теории взрывобезопасности важнее кривая, отделяющая область, в пределах которой маловероятен взрыв. Такая граница соответствует $Y = 8 \text{ м}^{1/2}$ (см. рис. 3, а, линия 2). Ниже этой прямой на 20 отказов приходится только одна детонация.

Чтобы ответить на вопрос, почему возникла детонация, оценим величину U_0 , при которой время уноса монослоя частиц становится меньше времени его сгорания. В рамках данной модели вклад газообразования за счет горения слоя ВВ по поверхности становится пренебрежимо малым по сравнению с горением частиц в объеме. Выражение для расчета U_0 , полученное в [1], для данной схемы опыта принимает вид

$$U_0 = Y_* u_m \sqrt{\pi/(10\rho_r \rho_ч d_ч)}.$$

При $u_m = 0,6 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (гексоген), $\rho_r = 0,1 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_ч = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$, $d_ч = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ получим $U_0 = 3,5 Y_*$, м/с. Вдоль прямой $Y_* = 9 \text{ м}^{1/2}$ $U_0 = 32 \text{ м}/\text{с}$, вдоль линии $Y_* = 8 \text{ м}^{1/2}$ $U_0 = 28 \text{ м}/\text{с}$. Обе эти величины больше полученного в опытах [1] значения $U_0 = 21 \text{ м}/\text{с}$. Этот результат мог бы показаться несколько странным — предельная скорость уноса для

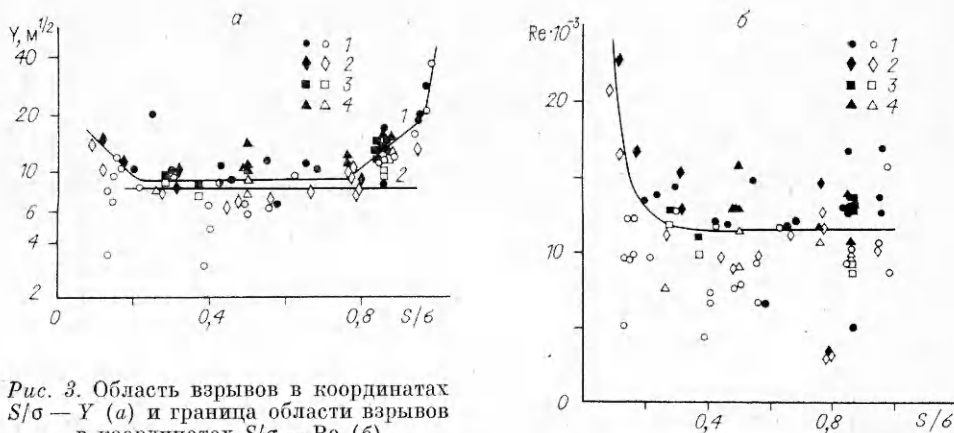


Рис. 3. Область взрывов в координатах $S/\sigma - Y$ (а) и граница области взрывов в координатах $S/\sigma - Re$ (б).

Стальные трубы: 1 — гексоген, 2 — гексоген с азотной кислотой, 3 — мелкодисперсный октоген; фторопластовые трубы: 4 — гексоген.

свободно насыпанного слоя больше, чем для цементированного, если бы не опыт при $S/\sigma = 0,57$ (см. рис. 3, а), в котором детонация произошла при $Y = 6,6 \text{ м}^{1/2}$. Если с учетом этого опыта принять $Y_* = 6 \text{ м}^{1/2}$, то получим $U_0 = 21 \text{ м/с}$ (как в [1]). Ниже этой точки взрывов нет, хотя, к сожалению, опытов при $Y \leq 6$ мало.

Ударные волны образуются первоначально в свободном пространстве трубы над слоем порошка, при гетерогенной детонации в системе порошкообразное горючее — газообразный окислитель. Условием такого способа инициирования детонации в принципе могло бы быть достижение определенного значения скорости движения газа в зазоре или критического числа Рейнольдса Re , достаточного для интенсивной турбулизации потока. С помощью этого предположения также можно описать экспериментальные данные, хотя и более формальным образом.

Проведем расчет критерия Re на выходе из трубы при постоянной поверхности горения, равной исходной поверхности порошка:

$$Re = \frac{U \rho_{\Gamma} d_{\text{ЭКВ}}}{\mu_{\Gamma}} = \frac{u_{\text{м}} S_{\Gamma} d_{\text{ЭКВ}}}{\sigma_{\text{св}} \mu_{\Gamma}} = \frac{u_{\text{м}} Al d_{\text{ЭКВ}}}{\sigma_{\text{св}} \mu_{\Gamma}}, \quad (6)$$

где последние два равенства написаны с учетом соотношения $\sigma_{\text{св}} U \rho_{\Gamma} = u_{\text{м}} S_{\Gamma} = u_{\text{м}} Al$, справедливого в квазистационарном случае при постоянной поверхности горения, равной Al . На рис. 3, б кривая отделяет область, в пределах которой число взрывов гораздо больше числа отказов (фактически на 30 взрывов 3 отказа) от области, в которой частота отказов велика по сравнению с частотой взрывов (35 отказов, 5 взрывов). Левая быстро снижающаяся ветвь кривой имеет примерно такой же смысл, как аналогичный участок кривой рис. 3, а. Она отвечает зарядам со слишком тонким слоем порошка — взрывы происходят при тем большем числе Re , чем этот слой тоньше.

Основная часть линии, отделяющая область преимущественно взрывов от области преимущественно отказов, отвечает значению $Re^* = 11\,500$, которое характеризует развитый турбулентный режим, и в принципе может использоваться для некоторой предварительной оценки наиболее взрывоопасных условий горения порошкообразных ВВ в трубах. Следует отметить при этом, что критическое значение $Re = 11\,500$ «не чувствует» приближения S/σ к единице: одна точка на рис. 3, а — отказ при $S/\sigma = 0,99$ — легко объясняется недостаточной точностью измерения зазора (в этом опыте при $d = 70 \text{ мм}$, $h = 2 \text{ мм}$, достаточно ошибиться в величине h всего на 2 мм, чтобы перейти из области под прямой в область над ней). Вместе с тем, условие $Re^* = \text{const}$ не дает уверенности в том, что при $Re < Re^*$ взрыв будет предотвращен: взрывы наблюдались при $Re = 7000, 5000$ и даже 3500. Какая величина Re является безопасной в данном случае при формальном подходе не вполне понятно. Условие $Y_* = \text{const} = 6 \text{ м}^{1/2}$ в этом отношении надежнее, так как обосновано всей совокупностью имеющихся результатов, расчетом и данными предшествующих измерений [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондриков Б. Н., Карпов А. С. Переход горения в детонацию зарядов с продольным цилиндрическим каналом // ФГВ.— 1992.— 28, № 3.— С. 58—65.
2. Андреев К. К., Попова П. П. О горении пентаэритриттетранитрата // ЖФХ.— 1961.— 35, № 9.— С. 1979.
3. Skidmore E. L., Woodruff N. P. Wind erosion forces in the United States and their use in predicting soil loss. Agriculture Hand Book, U. S. Dept. of Agriculture, 1968.— P. 8.