

ная диффузионная волна будет успевать распространяться раньше, чем последующая волна тепловой релаксации. Однако в начальный момент скорость реакции в кинетическом режиме невелика, поэтому выгорание не будет влиять на развитие процесса и температура будет плавно расти (скорость реакции тоже). Затем происходит воспламенение и переход в диффузионную область. Дальнейший рост скорости реакции будет ограничен влиянием выгорания исходного реагента, как в случае д). Но здесь при снижении температуры до определенного уровня произойдет «потухание», так как времена тепловой релаксации в силу начальных значений параметров в данном диапазоне меньше, чем в случае д). Таким образом, система возвращается в первоначальное состояние (в кинетическую область).

ж) Диапазон изменения параметра  $S > S_+$  соответствует случаю, описанному в [2], когда значения  $\delta_{\pm}$  определяют критические условия воспламенения и потухания, т. е. это область скачкообразного перехода из кинетической области в диффузионную и обратно при квазистационарной концентрации.

*Поступила в редакцию 2/II 1981*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Вольперт, С. И. Худяев. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики. М.: Наука, 1975.
2. Н. Е. Коловертных, С. И. Худяев, А. С. Штейнберг. ФГВ, 1980, 16, 4.
3. В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. ЖФХ, 1964, 38, 11.
4. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
5. Tadao Takeno, Kenji Sato. Comb. Flame, 1980, 38, 1.
6. N. N. Semenov. Zeitschr. phys. Chemie, 1928, 48, 571.

УДК 662.215.1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ СИЛЬНОРАЗБАВЛЕННЫХ ПОРИСТЫХ ВВ. II. ВЛИЯНИЕ ИНЕРТНОЙ ДОБАВКИ НА СТРУКТУРУ ФРОНТА, ПАРАМЕТРЫ И ВРЕМЯ РЕАКЦИИ

*К. К. Шведов, А. И. Анискин, А. Н. Ильин, А. Н. Дремин  
(Черноголовка)*

В работе [1] исследовалось влияние инертных добавок на критические условия распространения детонации и вид зависимости скорости детонации от диаметра заряда в сильноразбавленных пористых ВВ на основе тротила и гексогена. Данная работа — продолжение этих исследований, она посвящена рассмотрению влияния инертных добавок на параметры детонации, структуру фронта детонационной волны и время реакции.

Большинство экспериментов проделано с теми же смесями, что и в [1]. Перечисленные характеристики определялись в основном электромагнитным методом [2].

#### Влияние инертных добавок на структуру детонационного фронта

Под детонационным фронтом будем понимать ударный фронт и зону химической реакции за ним до состояния Чепмена — Жуге. По структуре детонационного фронта можно судить о процессе детонации и механизме

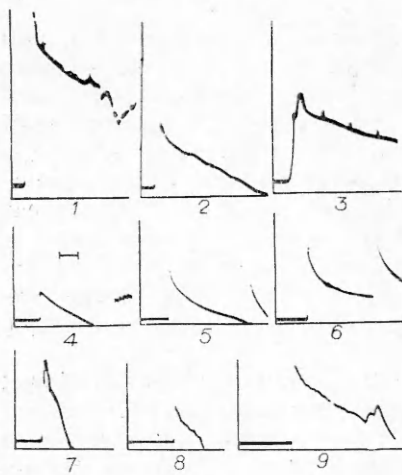


Рис. 1. Осциллограммы записей массовой скорости в зарядах различной толщины  $\Delta$  и диаметра  $d$ .

Масштаб времени 2 мкс (кадры 1—3 — метки на осциллограммах, для остальных — показан на кадре 4).

разложения вещества, так как они тесно связаны между собой. Известно, что для нормальных режимов детонации пористых ВВ характерны сравнительно высокие значения параметров и наличие повышенных давлений и массовых скоростей во фронте волны (химпик) [3]. Это указывает на принципиальную применимость к таким системам модели Зельдовича — Неймана — Дюринга, отводящей решающую роль ударной волне в процессе распространения детонации и разложения вещества [4].

При сильном разбавлении пористых ВВ инертными добавками значительно падают величины параметров детонации. При этом может реализоваться отличный от ударного механизм разложения вещества, что должно приводить к изменению структуры детонационного фронта. Поэтому рассмотрим прежде вопрос о качественном влиянии процентного содержания и дисперсности инертных добавок на структуру детонационного фронта в зарядах различного диаметра. Для примера на рис. 1 приведены некоторые характерные осциллограммы записей массовой скорости  $u(t)$  в исследованных смесях (смеси ТНТ с различным массовым содержанием NaCl: 1 — 75/25,  $\Delta = 60$  мм, 2 — 50/50,  $\Delta = 40$  мм, 3 — 25/75,  $\Delta = 80$  мм; смеси гексоген —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  25/75, размер частиц добавки  $\delta = 0,1$  мм: 4 —  $d = 20$  мм, 5 —  $d = 40$  мм, 6 —  $d = 80$  мм; 7 — гексоген —  $\text{Al}_2\text{O}_3$  25/75,  $\delta = 0,5$  мм,  $d = 20$  мм; 8 — гексоген — NaCl 25/75,  $\delta = 0,8 \div 1,0$  мм,  $d = 20$  мм; 9 — гексоген — NaCl 25/75,  $\delta = 1,2$  мм,  $d = 40$  мм). Кадры получены при различной чувствительности осциллографа и поэтому не дают наглядного представления об изменении амплитуды. Однако временной масштаб на кадрах 1—3, а также кадров 4—9 одинаков, что позволяет проследить за трансформацией химпика во времени. Разбавление ВВ инертной добавкой (до 85% по массе) приводит к «размазыванию» ударного фронта и увеличению времени реакции, химпик несколько сглаживается, но при достаточно больших размерах заряда не исчезает полностью (см. рис. 1, 1—3). Независимо от добавки химпик не наблюдается при близких к критическим размерам заряда (см. рис. 1, 4).

Отсутствие на осциллограммах химпика при малых размерах заряда можно было бы объяснить методическими трудностями его регистрации из-за искривления фронта детонационной волны и вследствие этого увеличения времени завала осциллограмм записи  $u(t)$ . Однако оценка максимального завала фронта на осциллограммах записи  $u(t)$  за счет искривления фронта по оси заряда при длине рабочей части алюминиевого датчика  $l = 5$  мм (толщина 0,15—0,2 мм) и реальной кривизне фронта, которая исследовалась в [1], дает время 0,2—0,3 мкс. Экспериментально наблюдаемый завал фронта по времени достигает в исследованных смесях 0,5—0,6 мкс и не зависит от диаметра заряда. Поэтому отсутствие излома на записи  $u(t)$  при размерах заряда, близких к критическим, как и в индивидуальных ВВ, связано, очевидно, с влиянием других факторов.

Как отмечалось в работе [1], на критический диаметр и вид зависимости  $D(d)$  сильное влияние оказывает дисперсность добавки. На рис. 1, 4—9 показаны некоторые примеры влияния дисперсности добавки на профиль  $u(t)$  в зарядах различного диаметра. В сильноразбавленных смесях с крупнодисперсной добавкой ( $\delta = 0,5$  мм  $>$   $\delta^*$ ) спад  $u(t)$  в зоне реакции линейный, как и в индивидуальных ВВ (см. рис. 1, 7—9). Это, видимо, свиде-

тельствует о том, что скорость разложения ВВ в зоне реакции не меняется. В смесях с мелкодисперсной добавкой ( $\delta = 0,1 \div 0,15 \text{ мм} < \delta^*$ ), даже при близких к идеальным режимам детонации, профиль  $u(t)$  в зоне реакции вогнутый (см. рис. 1, 5, 6). В этих случаях, по-видимому, скорость разложения ВВ максимальна в начале и уменьшается к концу зоны реакции вследствие снижения температуры продуктов из-за прогрева добавки.

Таким образом, изменение размеров частиц добавки ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{NaCl}$ ) с 0,5 до 0,1—0,15 мм в смеси с гексогеном 75/25 приводит к отличию в профиле  $u(t)$  в зоне реакции. Эти отличия сопровождаются и количественными изменениями детонационных характеристик. В частности, при  $d = 20 \text{ мм}$  в смесях гексогена с 75%-ным содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{NaCl}$  с  $\delta \leq 0,1 \text{ мм}$  излом на записях  $u(t)$  не наблюдается ( $D = 1,5 \div 2,0 \text{ км/с}$ ), но регистрируется химпик, если  $\delta \geq 0,5 \text{ мм}$  ( $D = 4,0 \div 4,7 \text{ км/с}$ ).

В работе [5] на смесях гексоген —  $\text{NaCl}$  15/85 в зарядах с  $d = 20 \text{ мм}$  также наблюдалось два типа профилей  $u(t)$  (с химпиком и без него), но при одной скорости детонации ( $D = 2,1 \text{ км/с}$ ). В связи с этим высказаны соображения о возможности пульсаций давления на ударном фронте детонационной волны в порошкообразных ВВ. Пульсации объясняются в [5] действием двух конкурирующих процессов: возникновением очагов химической реакции с последующим горением и уплотнением порошкообразного ВВ из-за роста давления, препятствующего распространению горения. Резкое повышение давления приводит к уплотнению прилегающего слоя ВВ и срыву воспламенения. Снижение давления за счет неполноты химического превращения облегчает протекание химической реакции, что опять приводит к росту давления и процесс повторяется.

Однако, как следует из приведенных данных, при низких скоростях детонации (мелкодисперсная добавка) в зарядах с  $d = 20 \text{ мм}$  в пористых смесях на основе гексогена и тротила химпика не наблюдается. Появление его в некоторых опытах в [5] непонятно. Возможно, оно связано с особенностями монтажа зарядов.

Исчезновение точки излома на профиле  $u(t)$  при малых диаметрах заряда обусловлено, очевидно, не качественным изменением механизма превращения вещества, а влиянием газодинамических факторов. При уменьшении диаметра заряда и параметров детонации (скорость, давление) градиент спада массовой скорости в зоне реакции уменьшается, а в волне разрежения за точкой Жуге увеличивается. При некотором диаметре заряда оба значения градиента сравниваются, что приводит к треугольному профилю  $u(t)$  без заметного излома (рис. 2). При уменьшении диаметра заряда с 60 до 40 мм массовая скорость в точке излома падает, а время излома увеличивается. Очевидно, можно было ожидать подобной зависимости и при дальнейшем уменьшении диаметра заряда. Однако излома на записи  $u(t)$  в зарядах с  $d = 20 \text{ мм}$  не наблюдается, а максимальное значение массовой скорости оказывается явно выше, чем в точках излома кривых  $d = 40 \text{ мм}$  и  $60 \text{ мм}$ . Время завала фронта осциллограмм  $u(t)$  в зарядах с  $d = 40 \text{ мм}$  и  $60 \text{ мм}$  явно меньше времени излома ( $0,5\text{—}0,5 \text{ мкс}$ ) кривых  $u(t)$  для этих зарядов. Отсюда следует, что в случае треугольного профиля  $u(t)$  состояние с максимальным зафиксированным значением  $u$  находится в зоне реакции, разложение ВВ происходит и в волне разрежения. Поэтому зафиксировать окончание реакции не удается.

Не исключено, конечно, что при значительном увеличении размеров частиц ВВ или добавки, особенно в высокопористых системах, ударный фронт «размажется» столь сильно, что ча-

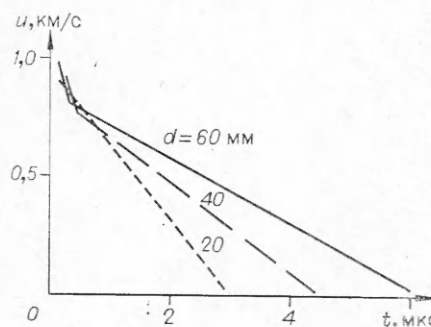


Рис. 2. Зависимости  $u(t)$  в смесях гексоген —  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  в зарядах различного диаметра.

стичное или полное разложение ВВ будет происходить за время сжатия. Реализация этого случая означала бы осуществление детонационного процесса превращения ВВ, отличного от модели Зельдовича — Неймана — Дюринга. Согласно этой модели, ВВ при детонации вначале только сжимается в ударном фронте, а уже потом реагирует (химпик).

В случае полного превращения ВВ еще в процессе сжатия изменение состояния вещества в ходе реакции описывается в координатах  $p - v$  отрезком прямой Михельсона, соединяющим начальную точку и непосредственно точку адиабаты конечных продуктов разложения. При таком процессе детонации химпика не должно быть, а максимальное значение массовой скорости профиля  $u(t)$  должно соответствовать состоянию конечных продуктов разложения.

В работе [6] при исследовании детонации пористых смесей гексогена с мишорой получены экспериментально треугольные профили  $u(t)$  без химпика в зарядах с  $d = 50$  мм. На основании этого сделан вывод о реализации режима детонации, отличного от модели Зельдовича — Неймана — Дюринга. Однако, как следует из приведенного анализа, треугольный профиль  $u(t)$  сам по себе не означает отсутствие химпика и может быть следствием влияния газодинамических факторов при малых диаметрах заряда.

Факт наличия или отсутствия химпика в детонационной волне не позволяет сделать однозначных выводов о выполнении условия касания и месте положения звуковой поверхности. Положение ее может быть найдено измерением скорости фронта, массовой скорости и скорости звука за фронтом детонационной волны, как место, где  $D = u + c$ . Указанные параметры измерены в смесях гексоген — NaCl 20/80 в зарядах с  $d = 40$  мм. Записи  $u(t)$  в этих смесях имели треугольный вид с завалом фронта около 0,6 мкс по времени. Скорость звука измерялась электромагнитным методом [2] на разных базах (2, 4 и 6 мм) и оказалась равной 1,45 км/с независимо от базы измерения. Значения скорости фронта и массовой скорости составили 2,5 и 0,4 км/с соответственно. Это означает, что  $u + c < D$  и состояние Чепмена — Жуге в данном случае находится не далее 2 мм от ударного фронта или около 1 мкс по времени. Таким образом, в данном случае звуковая поверхность находится довольно близко к точке с максимальным значением массовой скорости, но разложение ВВ здесь явно не заканчивается.

Сильноразбавленные пористые ВВ — сложные системы, поэтому в них по различным причинам возможно осуществление недосжатых режимов детонации. Одной из причин этого может быть сложная кинетика тепловыделения из-за поглощения тепла инертным наполнителем. Однако в случае недосжатой детонации профиль  $u(t)$  или  $p(t)$  должен иметь характерное плато [3]. На экспериментальных профилях  $u(t)$  во всех исследованных смесях таких особенностей не отмечено, что, возможно, связано с ограниченностью диаметра заряда. Поэтому для обнаружения недосжатого режима детонации поставлены специальные опыты по выходу детонации из пересжатого режима в смеси гексоген — NaCl 20/80 в зарядах с  $d = 100$  мм. Пересжатая детонация создавалась детонацией заряда гексоген — NaCl 50/50 того же диаметра, находящегося в контакте с основным. На профилях  $u(t)$  в области от границы раздела между различными смесями до установления характерного для смеси 20/80 режима детонации на расстоянии 40 мм не обнаружено отстающей от детонационного фронта ударной волны.

В работе [7] высказывались соображения о том, что в смесях с тяжелыми добавками возможно существование недосжатых режимов детонации благодаря большой скорости звука в добавке по сравнению со скоростью звука в продуктах детонации. В описываемых опытах сильно отличающиеся по скорости звука добавки ( $Al_2O_3$  с  $c_{прод} = 10,8$  и  $c_{попер} = 6,33$  км/с [8] и NaCl с  $c_{прод} = 4,42$  и  $c_{попер} = 2,55$  км/с [9]) при близкой дисперсности дают одинаковые значения скорости детонации. Таким об-

разом, доказательств осуществления недосжатых режимов в исследованных смесях нет.

Как следует из теоретического анализа [3], условие касания для детонационной волны с турбулентным фронтом должно выполняться, если состояние вещества в ходе реакции на  $p-v$ -диаграмме изменяется сверху вниз и коэффициент Грюнайзена  $\Gamma > 2/3$ . Эти условия в большинстве случаев детонации смесевых ВВ выполняются. Рассмотренные факты и стационарность взрывных процессов на больших длинах зарядов позволяют считать, что, по крайней мере в системах с химпиком, условие касания выполняется и поэтому можно использовать основные соотношения теории детонации для определения ее параметров. Состояние Чепмена — Жуге находилось по химпику, что, строго говоря, справедливо только для идеальных или близких к ним режимов детонации.

### Влияние инертных добавок на параметры детонации и время реакции

В табл. 1 приведены результаты определения скорости фронта  $D$ , массовой скорости  $u$ , давления  $p$  и показателя политропы продуктов  $n$  при детонации зарядов различной толщины слоя  $\Delta$  или диаметра  $d$  (размеры цилиндрических зарядов взяты в скобки), а также значения времени химпика  $\tau$  (отмечены звездочкой). В случаях, когда на записях  $u(t)$  не наблюдалось точки излома,  $\tau$  означает время завала фронта осциллограмм записи  $u(t)$  и значения  $u$  и  $p$  относятся к ударному фронту.

Приведенные результаты являются средними из 3—5 опытов, точность определения  $D \simeq 2 \div 3\%$ ,  $u \simeq 3\%$ ,  $\tau \simeq 10\%$ ,  $p \simeq 5 \div 6\%$ . В ряде опытов на смесях с NaCl наблюдался разброс значений  $D$  и  $u$ , значительно превосходящий точность измерений. Это, как отмечалось в [1], связано с неустойчивостью детонационных режимов. Результаты таких опытов отражены лишь частично.

Анализ данных табл. 1 показывает, что при заданном процентном содержании добавки параметры детонации  $D$ ,  $u$ ,  $p$  растут с увеличением диаметра заряда, как и в индивидуальных ВВ. Однако, как отмечалось в [1], иногда наблюдаются S-образные и скачкообразные зависимости  $D(d)$ . Соответственно с изменением  $D(d)$  меняются  $u$  и  $p$ .

Как видно из табл. 1, введением добавок различной дисперсности можно менять в широких пределах скорость и давление детонации при заданном диаметре заряда. Максимальные значения скорости фронта в идеальных режимах детонации наблюдаются для крупнодисперсных добавок ( $\delta \geq 0,5$  мм). Оценка снижения  $D$  за счет введения добавки из выражения  $D^2 \sim Q$  показывает, что экспериментальные значения  $D$  значительно (на 0,5—1,5 км/с) превосходят расчетные.

В работах [10, 11] для расчета давления детонации ВВ с инертными добавками используется формула  $p = \rho_0 D^2 (1 - \alpha \rho_0 / \gamma) / (n + 1)$ , где  $\alpha$  и  $\gamma$  — процентное содержание и плотность добавки соответственно. Она получена в предположении о несжимаемости и непрогреваемости добавки, что, как следует из приведенных данных, ближе всего соответствует поведению крупнодисперсных ( $\delta \geq 0,5$  мм) добавок. Однако для этих случаев расчетные давления также являются заниженными до 50%. Более близкое (до 10—15%) совпадение расчетных и экспериментальных результатов по давлению наблюдается для смесей с 75—85%-ным содержанием мелкодисперсной ( $\delta \simeq 0,1$  мм) добавки, что, видимо, случайно и связано со снижением параметров из-за потерь на прогрев добавки. Действительно (см. табл. 1), уменьшение размера частиц  $Al_2O_3$  с 0,5 до 0,1 мм в смесях с гексогеном приводит к падению  $D$  в 1,5 и давления в 2,7 раза при прочих близких условиях.

Рассмотренные данные свидетельствуют о сложном влиянии инертной добавки на параметры детонации пористых ВВ. Возможная взаимная ком-

Таблица 1

ВВ, плотность, размер частиц добавки	$\Delta(d)$ , мм	$D$ , км/с	$\tau$ , мкс	$u$ , км/с	$p$ , кбар	$n$	$t_{в}$ , мкс
1	2	3	4	5	6	7	8
ТНТ—NaCl 75/25, $\rho_0=1,0$ г/см <sup>3</sup>	15	2,65	0,5	1,05	27,8	—	2,7
	20	2,8	0,4	1,1	30,8	—	3,6
	30	3,0	0,7	1,32	39,4	—	5,8
	40	3,1	0,9	1,4	43,4	—	—
	55	3,6	1,26*	1,24*	44,7*	1,9	—
	60	3,6	1,2*	1,30*	47*	1,8	—
	75	3,6	1,26*	1,20*	43*	2,0	—
ТНТ—NaCl 50/50, $\rho_0=1,05$ г/см <sup>3</sup>	20	2,05	0,5	0,9	19,4	—	5,8
	40	2,4	0,7	0,9	22,7	—	8,1
	50	2,6	1,5*	0,95	26*	1,7	9,7
	70	2,7	1,7*	1,0*	28,4*	1,7	—
	80	3,1	1,4*	1,15*	37,4*	1,7	—
	100	3,05	1,5*	1,10*	35,0*	1,8	—
ТНТ—NaCl 25/75, $\rho_0=1,27$ г/см <sup>3</sup>	25	1,5	0,6	0,55	10,5	—	8,4
	30	1,5	0,56	0,57	10,8	—	11,0
	40	1,73	0,7	0,54	11,8	—	12,3
	60	1,77	1,4*	0,52*	11,7*	2,4	16,0
	(72)	1,83	1,7*	0,55*	12,7*	2,3	—
	80	1,80	1,4*	0,58*	13,2*	2,1	19,3
	(80)	1,85	1,7*	0,6*	14*	2,1	21,5
	120	1,95	1,3*	0,6*	14,8*	2,2	—
ТНТ—SiC 75/25, $\rho_0=1,12$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,12$ мм	(20)	2,5	0,4	0,8	22,2	—	—
	(30)	2,8	0,5	1,04	32,6	—	4,5
	(36)	3,6	0,4	1,59	64	—	—
	(40)	3,9	1,1*	1,07*	47*	2,6	5,4
	(60)	4,15	1,05*	1,1*	51*	2,8	—
ТНТ—SiC 25/75, $\rho_0=1,40$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,3$ мм	(40)	1,58	2,4*	0,4*	—	3,0	—
	(80)	1,72	1,7*	0,45*	—	2,8	—
ТНТ—Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 20/80, $\rho_0=1,7$ г/см <sup>3</sup>	40	2,5	0,5	0,8	34	—	—
ТНТ—SiC 70/30, $\rho_0=1,1-1,07$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,02$ мм	(120)	2,8	2,0	0,93	—	—	—
	(80)	5,05	0,93	0,81	—	—	—
	1,5						
Гексоген—NaCl 25/75, $\rho_0=1,35 \div 1,4$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=1,2$ мм	20	3,45	0,5	0,6	28,5	—	4,2
	20	4,33	0,55*	0,93*	56,7	3,5	3,1
	30	2,9	0,5	0,64	25,6	—	5,7
	30	4,3	0,7	0,8	47,2	—	—
	40	3,9	0,6	0,8	43,0	—	—
	40	4,6	0,5*	1,05	66,5	3,4	4,1
	60	2,9	0,9	1,0	40,0	—	—
	60	4,7	0,5*	1,15*	74,5	3,1	7,3
Гексоген — NaCl 25/75, $\rho_0=1,35 \div 1,4$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,5$ мм	20	2,7	0,7	0,5	18,5	—	—
	20	3,9	0,55	0,7	37,5	—	—
	20	4,7	0,2	1,2	78	—	—
	30	4,41	0,5*	1,06*	64,5*	3,1	—
	40	4,6	0,5*	1,15*	76*	3,0	—
	60	4,6	0,5	1,1*	70*	3,2	—
Гексоген—NaCl 25/75, $\rho_0=1,35 \div 1,4$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,35$ мм	60	4,36	0,5*	1,05	63	3,16	6,0



Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
Гексоген — NaCl 25/75, $\rho_0=1,35 \div 1,4$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,1 \div 0,25$ мм	(40)	1,56	0,4	0,6	12,7	—	9,0
	(60)	2,2	0,4	0,8	23,7	—	11,5
Гексоген — Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 25/75, $\rho_0=2,0-2,2$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,5$ мм	(10)	3,6					
	15	4,35					
	20	4,29	0,5*	0,94	84,6*	3,6	2,4
	30	4,53	0,4*	0,96*	82,5*	3,7	2,8
	40	4,68	0,45*	1,0*	98*	3,7	3,7
	60	4,68	0,45*	1,0*	98*	3,7	5,1
	80	4,7	0,45*	1,0*	99*	3,7	8,1
Гексоген — Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 25/75, $\rho_0=1,8-2,0$ г/см <sup>3</sup> , $\delta=0,1$ мм	(20)	2,13	0,2	0,68	27,5	—	4,7
	(30)	2,54	0,1	0,85	41	—	5,0
	(40)	2,8	0,1	1,0	53,2	—	6,5
	(60)	3,0	1,49*	0,58*	33,0*	4,2	8,5
	(80)	3,15	1,49*	0,62	37,2*	4,1	9,1
Гексоген — Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 25/75, $\delta=0,1$ и 0,5 мм, 50/50 $\rho_0=2,0$	40	3,45	1,1*	0,65*	45	4,3	5,0
Гексоген — SiC 25/75, $\rho_0=1,5 \div 1,1$ , $\delta=0,12$ мм	30	1,82	0,4	0,67	18,8		6,3
	40	2,3	0,4	0,8	28,5		6,5
	60	2,72	1,5*	0,62*	26,0*	3,4	7,6
	100	3,0	1,5*	0,72*	33,4*	3,2	10,2
	120	2,9	1,45*	0,70*	38,4*	3,15	11,4
Гексоген — B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 25/75, $\rho_0=1,1-1,2$ , $\delta=0,35$ мм	60	2,3	0,4	0,1	26,6	—	12,9
Гексоген — NaCl 20/80, $\rho_0=1,38$	(20)	1,7	0,6	0,5	12	—	5,3
	(25)	2,0	0,6	0,62	17	—	5,8
	(30)	2,05	0,6	0,65	18,4	—	6,2
	(35)	2,17	0,6	0,68	20,0	—	—
	(40)	1,9	0,7	0,74	19,4	—	9,5
	(40)	2,6	1,13*	0,66*	23,7	2,9	—
	(40)	2,48	1,3*	0,65*	23,3	2,85	—
	(45)	2,6	0,35	1,03	37,0	—	9,3
	(45)	2,16	0,6	0,73	21,8	—	—
	(60)	2,6	1,1*	0,75*	27*	2,5	9,1
	(80)	3,0	1,0*	0,8*	33*	2,8	12,0
Гексоген — Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> 20/80, $\rho_0=1,9$	(8)	1,5	—	—	—	—	—
	(10)	1,8	—	—	—	—	—
	(15)	2,54	—	—	—	—	—
	(18)	2,78	—	—	—	—	—
	(20)	2,84	0,3	0,86	46	—	3,1
	(30)	3,38	0,65*	0,72*	46*	3,7	3,9
	(40)	3,52	0,6*	0,75*	50*	3,7	4,7
	(60)	3,57	0,5*	0,8*	54,4*	3,5	6,1
Гексоген — NaCl 15/85, $\rho_0=1,3$	(30)	1,8	0,7	0,45	10,5	—	4,8
	(40)	1,8	0,7	0,46	10,8	—	—
	(80)	2,0	0,7	0,54	14,0	—	—
	(100)	2,2	0,95*	0,62*	17,7*	2,5	—
	(120)	2,1	1,05*	0,6	16,4	2,5	—

пенсация влияния отдельных факторов не позволяет надежно выявить роль каждого из них на простейших расчетных моделях и требует более детального рассмотрения.

При заданном процентном содержании добавки не удастся проследить зависимость  $n(p)$  в широком диапазоне давлений, так как химик

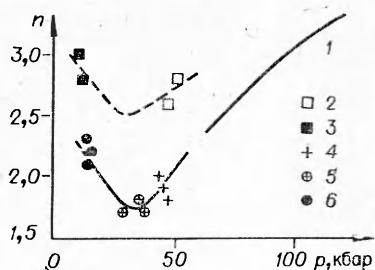


Рис. 3. Зависимость показателя политропы от давления в смесях ТНТ с добавками.

1 — индивидуальный пористый тротил; 2 — 25% SiC; 3 — 75% SiC; 4 — 25% NaCl; 5 — 50% NaCl; 6 — 75% NaCl.

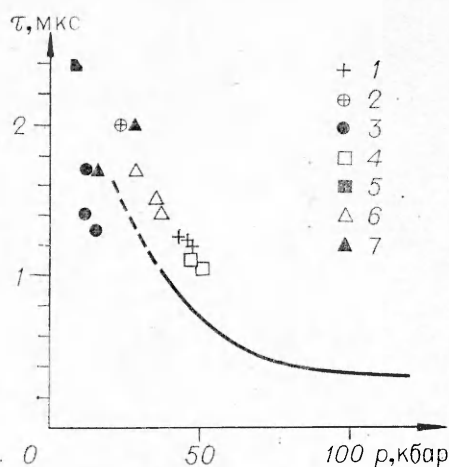


Рис. 4. Зависимость времени реакции от давления детонации в пористом тротиле (кривая) и смесях с добавками.

1 — 25% NaCl,  $\delta \approx 1,0$  мм; 2 — 50% NaCl,  $\delta \approx 1$  мм; 3 — 75% NaCl,  $\delta = 1,0$  мм; 4 — 25% SiC,  $\delta = 0,12$  мм; 5 — 75% SiC,  $\delta = 0,3$  мм; 6 — 30% SiC,  $\delta = 0,02$  мм,  $\rho_0 = 1,5$  г/см<sup>3</sup>; 7 — 30% SiC,  $\delta = 0,02$  мм,  $\rho_0 = 1,1$  г/см<sup>3</sup>.

четко фиксируется лишь при достаточно больших размерах заряда, когда давление практически не меняется. На рис. 3 показана зависимость  $n(p)$  индивидуального ТНТ и в смесях с различным содержанием добавки при близких к идеальным режимам детонации. Видно, что зависимость  $n(p)$  для смесей немонотонная. При увеличении содержания NaCl с 25 до 50% давление и показатель политропы падают, однако при  $\alpha = 75\%$   $n$  возрастает, несмотря на снижение давления.

При одинаковом  $\alpha$  и близком давлении показатель политропы в смесях с более тяжелой добавкой (SiC) выше (больше, чем в индивидуальном ВВ). Аналогичная картина наблюдается в смесях с гексогеном. Для индивидуального гексогена в области давлений 30—90 кбар  $n = 2,4$ , для смесей с 75%-ным содержанием NaCl  $n = 2,6 \div 3,0$ . Следует отметить также влияние дисперсности добавки на показатель политропы. В смесях гексогена с  $Al_2O_3$  и SiC дисперсностью  $\delta \approx 0,1$  мм он больше, чем в аналогичных смесях с размером частиц 0,5 мм при близких давлениях. Рост  $n$  в смесях с мелкодисперсной добавкой связан, видимо, с увеличением показателя политропы продуктов детонации ВВ из-за их охлаждения в результате прогрева добавки. Анализ результатов расчета изэнтропического расширения продуктов детонации гексогена зарядов различной плотности работы [11] показывает, что  $n$  существенно зависит от температуры продуктов в области малых давлений. Так, снижение температуры на 1000 К при постоянном давлении 10, 25 и 50 кбар приводит к росту  $n$  на 0,5, 0,3 и 0,2 соответственно. В области  $p > 100$  кбар температура практически не влияет на  $n$ .

Вероятно, снижение температуры продуктов детонации наряду с непосредственным влиянием содержания добавки приводит к росту  $n$  в смесях с тротилом в области малых давлений.

Полученные количественные данные по параметрам детонации и времени реакции позволяют более детально понять механизм влияния инертных добавок на различные стороны процесса детонации. На рис. 4 приведен график зависимости  $\tau(p)$  пористого индивидуального тротила и нанесены экспериментальные точки для различных смесей. Кривая для тротила построена на основе экспериментальных зависимостей  $\tau$  и  $p$  от  $\rho_0$  и диаметра заряда стационарной детонации пористых образцов с размером частиц  $\delta = 0,1$  мм [3] и экстраполирована в область низких давлений (штриховая линия), где получены основные результаты по смесям.



Несмотря на возможную неточность экстраполяции, можно сделать определенные выводы о влиянии добавок на время реакции. Из рис. 4 видно, что при содержании добавок NaCl и SiC  $\alpha = 25 \div 50\%$  время реакции смесей при одинаковом давлении больше, чем в индивидуальном ВВ, а при  $\alpha = 75\%$  меньше или близко к нему. Увеличение  $\tau$  в смесях с  $\alpha = 25 \div 50$  связано, вероятно, с тем, что в данных условиях мала положительная роль добавки в образовании очагов разложения, а основное влияние ее сводится к увеличению  $\tau$  за счет снижения температуры продуктов детонации в результате прогрева добавки.

Для строгого анализа роли прогрева важно знать, кроме теплофизических свойств, размеры частиц добавки в зоне реакции, что труднее всего сделать для частиц NaCl. Как отмечалось в [1], исходный размер частиц NaCl составлял 0,5—1,0 мм, но после смешения с ВВ распределение частиц по фракциям сменялось в сторону мелких фракций. В ударном фронте детонационной волны, очевидно, также происходит дробление, так что прогрев наиболее мелких фракций вполне возможен. Для подтверждения этих соображений сделаны эксперименты на смеси с 30%-ным содержанием мелкодисперсной фракции SiC ( $\delta = 0,02$  мм) при двух плотностях заряжания. В этих опытах (см. рис. 4, 6, 7) также получено увеличение  $\tau$  по сравнению с индивидуальным ВВ. Попытки получить аналогичные данные для смесей с 75%-ным содержанием мелкодисперсной фракции SiC ( $\delta = 0,02$  и 0,1 мм) не увенчались успехом из-за сильного роста критического диаметра детонации ( $d_{кр} > 100$  мм). Введение же 75% SiC ( $\delta = 0,03$  мм), как и NaCl, приводит к некоторому снижению  $\tau$  по сравнению с индивидуальным ВВ.

Это можно связать с положительным влиянием инертной добавки непосредственно на образование очагов разложения в ударном фронте. Такое влияние становится возможным благодаря большому содержанию и размеру частиц добавки, а также значительному (в 3—4 раза) уменьшению давления детонации, что снижает роль дробления и прогрева добавки. Информация о непосредственном влиянии добавки NaCl на возникновение очагов разложения получена методом торможения границы раздела, когда на ВВ в начальный момент времени действует только ударная волна и исключаются другие факторы, которые могут оказывать влияние на разложение ВВ в стационарной детонации. Скорость движения границы раздела парафиновый экран — исследуемое ВВ записывалась электромагнитным методом на зарядах с  $d = 60$  мм из индивидуального ТНТ и смесей ТНТ с 75% NaCl. Кроме торможения границы раздела записаны профили  $u(t)$  в смеси на различных расстояниях  $l$  от границы раздела, наглядно показывающие формирование химпика. Амплитуда ударной волны выбрана близкой к давлению в стационарной детонации смесей ТНТ — NaCl 25/75.

Результаты экспериментов приведены на рис. 5. Видно, что кривые

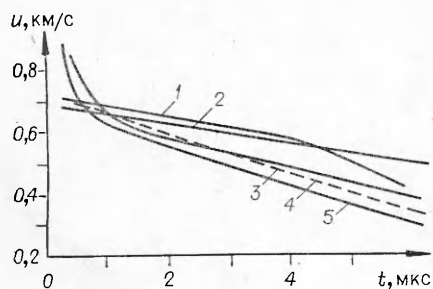


Рис. 5. Профили  $u(t)$  на различных расстояниях от границы раздела инерт-ВВ (1 — ТНТ, 2—5 — NaCl 25/75).

$l$ , мм: 1, 2 — 0, 3 — 10, 4 — 15, 5 — 40.

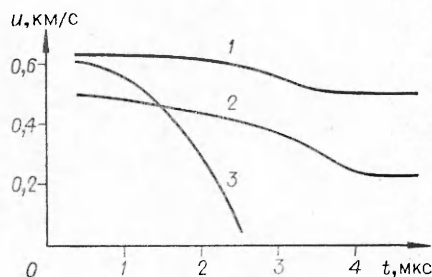


Рис. 6. Кривая торможения границы раздела парафин — ВВ.

1, 2 — гексоген — NaCl 25/75,  $\delta = 0,5$  и 1 мм; 3 — индивидуальный гексоген.

торможения границы раздела ТНТ и смеси близки. Наличие с самого начала наклона записей  $u(t)$  и его постоянство во времени указывает на то, что разложение в обоих случаях начинается сразу за время завала фронта и газодинамический эффект разложения смеси не хуже, чем в индивидуальном ВВ. При отсутствии положительного влияния добавки на разложение можно было ожидать значительно меньшего наклона зависимости  $u(t)$  для смеси как вследствие замены части ВВ на инерт, так и возможного уменьшения скорости разложения из-за снижения температуры продуктов. Вероятные отрицательные влияния этих факторов компенсируются увеличением начального числа очагов разложения в смеси за счет введения большого количества NaCl. Однако в целом положительное влияние добавки, видимо, мало, так как и в смеси, и в индивидуальном ВВ используемым методом не удается наблюдать окончание разложения за время наблюдений ( $\sim 5$  мкс) при выбранной амплитуде ударной волны ( $u = 0,7$  км/с).

При помещении датчика в ВВ на расстояние 10 мм от границы раздела значение  $u$  на ударном фронте сохраняется таким же, как и на границе раздела, но несколько увеличивается наклон  $u(t)$  за фронтом (см. рис. 5, 4). На расстоянии 15 мм от границы раздела на записях  $u(t)$  появляется хемпик, шириной по времени около 1,5 мкс, значение массовой скорости на фронте возрастает с 0,7 до 0,9 км/с. Наклон  $u(t)$  за изломом практически не меняется (см. рис. 5, 3). При дальнейшем увеличении  $l$  (см. рис. 5, 5) профиль  $u(t)$  сохраняется, происходит лишь некоторое сокращение ширины хемпика по времени. Появление хемпика в данном случае связано, видимо, с влиянием зафронтной области. Детали этого процесса остаются не ясными. Из кривых торможения границы раздела следует, что разложение ВВ в смеси начинается сразу при воздействии ударной волны, однако рост амплитуды фронта и формирование хемпика происходят лишь после прохождения фронтом значительного расстояния ( $l > 10$  мм). Возможно, это связано с индивидуальными особенностями разложения тротила (слабое газовыделение, отсутствие ускорения разложения за фронтом).

Более определенные выводы следуют из данных для гексогена. На рис. 6 кривые торможения границы раздела парафин — ВВ в чистом гексогене и смесях с NaCl 25/75 ( $\delta = 0,5 \div 1,0$  мм) при близких амплитудах воздействия ( $u = 0,5 \div 0,6$  км/с). Видно, что в отличие от ТНТ разложение индивидуального гексогена происходит с ускорением и заканчивается за время около 2,5 мкс (выход кривой торможения на плато). В смесях с NaCl также наблюдается выход кривых  $u(t)$  на плато, однако спад происходит медленнее, увеличивается время окончания разложения, а газодинамический эффект торможения (изменение  $u$  от начального до конечного значения) уменьшается. Это говорит о том, что добавки не оказывают

положительного влияния на разложение ВВ в ударной волне.

На рис. 7 приведены зависимости времени реакции от давления в стационарной детонации смесей гексогена с различными добавками. Видно, что при размерах частиц добавки  $\delta > 0,3$  мм ( $p > 50$  кбар) независимо от ее природы все точки ложатся на зависимость  $\tau(p)$  индивидуального гексогена. Это указывает на то, что используемые добавки не играют заметной положительной роли в возникновении очагов разложения, как можно было ожидать, исходя из физико-механических и теплофизических свойств добавок, которые приведены в табл. 2 [13].

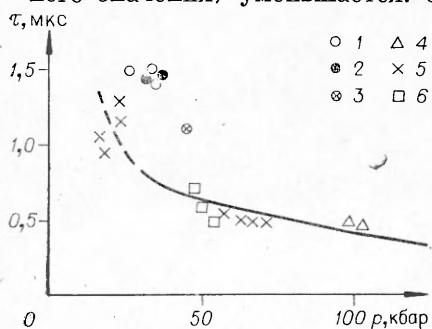


Рис. 7. Зависимость времени реакции от давления детонации в пористом гексогене и смесях с различными добавками.

1 — SiC,  $\delta = 0,1$  мм; 2 —  $Al_2O_3$ ,  $\delta = 0,1$  мм;  
3 —  $Al_2O_3$ ,  $\delta = 1,0 \div 0,5$  мм; 4 —  $Al_2O_3$ ,  $\delta = 0,5$  мм; 5 — NaCl; 6 —  $Ba(NO_3)_2$ .

Т а б л и ц а 2

Разбавитель	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T_{пл}$ , °С	$T_v$ , по Моосу	$c_p$ , Дж/(моль·К)	$\lambda$ , кал/(см·с·К)	$\kappa$ , см <sup>2</sup> /с
SiC	3,08	2700	8—9	26,65	0,045	0,092
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,96	2015	9	79,0	0,069	0,093
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,84	450	8—9	62,05	—	—
NaCl	2,16	800	2—2,5	50,79	0,023	0,054

Таким образом, из данных по смесям гексогена и тротила с 75%-ным содержанием крупнодисперсной добавки следует, что время реакции смеси остается таким же, как в индивидуальном ВВ (гексоген) или несколько сокращается (тротил), тогда как критический диаметр указанных смесей возрастает в 2—3 раза [1]. Этот результат указывает на неоднозначность связи  $d_{кр}$  со временем реакции и на определяющую в данном случае роль энергетики заряда.

Уменьшение размеров частиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiC до 0,1 (область  $p < 50$  кбар) приводит, как видно из рис. 7, к значительному (в 2 раза) росту времени реакции в смесях по сравнению с индивидуальным гексогеном или смесями с крупнодисперсной добавкой при близких давлениях. Этот факт указывает на то, что основное влияние на  $\tau$  и параметры детонации пористых ВВ инертная мелкодисперсная добавка оказывает, видимо, через снижение температуры продуктов разложения. Амплитуда ударного фронта не определяет однозначно время реакции смесей в области низких давлений, где разложение идет по механизму «горячих точек». Возможно, аналогичное положение имеет место и в большинстве случаев разложения индивидуальных твердых и жидких ВВ в ударных и детонационных волнах, когда превращение вещества не носит характер нормального адиабатического взрыва.

В работе [14] отмечается корреляция между критическим диаметром и температурой продуктов детонации в ряде жидких ВВ. Ее можно объяснить влиянием температуры продуктов разложения на время реакции и критический диаметр. Такое влияние кажется возможным из-за сильного вырождения теплового взрыва в условиях нормальной детонации, о чем свидетельствует треугольный профиль массы скорости в зоне реакции детонационной волны [3]. При детонации индивидуальных ВВ трудно разделить влияние давления и температуры ударного сжатия ВВ и температуры продуктов разложения на время реакции. В какой-то мере это удастся сделать в экспериментах на смесях с прогреваемой и непрогреваемой добавкой. Прогрев мелкодисперсной добавки приводит к снижению температуры и дополнительным (по сравнению с крупнодисперсной добавкой) потерям энергии, что оказывает сильное влияние на все характеристики процесса детонации.

Сделаны приближенные расчеты прогрева Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в смесях с гексогеном для наблюдаемых в экспериментах времен реакции по соотношению  $\delta \approx \sqrt{\kappa \tau}$ . Температуропроводность  $\kappa$  считалась постоянной и равной 0,1 см<sup>2</sup>/с. Расчеты показали, что для  $\tau = 0,5$  мкс (индивидуальный гексоген и смеси с крупнодисперсной добавкой) прогретая масса составляет менее 5% от общей массы добавки при  $\delta > 0,3$  мм. Поэтому при  $\delta > 0,3$  мм в исследованных смесях с гексогеном практически нет потерь на прогрев, что и обуславливает высокие параметры детонации и независимость  $\tau$  от наличия добавки. Прогретая масса становится существенной при  $\delta < 0,1$  мм как из-за увеличения поверхности теплоотвода, так и снижения параметров детонации и возрастания времени реакции. Так, при  $\tau = 1,5$  мкс и  $\delta = 0,1$  мм прогретая масса составляет ~20%. Температура продуктов детонации гексогена, как показывают расчеты, снижается с 4 до 2,6 кК, а тепловые потери достигают приблизительно половины теплоты

взрыва ВВ в смеси. Скорость детонации при таких потерях должна снизиться в 1,4 раза, что близко к экспериментально наблюдаемому различию в значениях  $D$  для смесей гексогена с  $Al_2O_3$ ,  $\delta = 0,5$  и  $0,1$  мм ( $\sim 1,5$  раза).

Эти оценки подтверждают основные результаты по влиянию процентного содержания и дисперсности добавки на критический диаметр, параметры детонации и время реакции.

### Выводы

1. Для детонации пористых ВВ с инертными добавками, как и для детонации индивидуальных пористых ВВ, справедливы основные представления и выводы современной гидродинамической теории детонации.

2. Влияние твердых, тугоплавких инертных добавок на механизм разложения пористых ВВ зависит от индивидуальных свойств ВВ и главным образом от дисперсности добавок. При исключении заметного прогрева добавок в смесях с тротилом наблюдается некоторое положительное влияние их на возникновение очагов разложения и суммарное время реакции. В случаях с гексогеном такого влияния не обнаружено, что обусловлено, видимо, физической неоднородностью пористой структуры заряда и достаточно высокими давлениями детонации смесей.

3. Основное влияние на критический диаметр, структуру фронта, параметры детонации и время реакции пористых ВВ инертные добавки оказывают через процессы поглощения энергии в зоне реакции. Любые факторы, приводящие к потерям энергии, могут приводить к неоднозначности детонационного режима в системе с заданной потенциальной химической энергией.

4. Для надежного теоретического описания режимов детонации пористых ВВ с большим содержанием инертных добавок необходимо учитывать состояние добавки в зоне реакции.

*Поступила в редакцию 4/V 1981*

### ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Шведов, А. И. Анискин и др. ФГВ, 1980, 16, 3.
2. П. Ф. Плохил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М.: Наука, 1969.
3. А. Н. Дремни, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
4. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
5. В. Г. Хотин, В. А. Пономарев. ФГВ, 1973, 9, 2.
6. М. М. Бойко, В. П. Крамаренко, В. С. Соловьев. Тр. Всес. симпозиума по горению и взрыву. Детонация. Черноголовка, 1977.
7. Л. В. Альтшулер, В. Т. Рязанов, М. П. Сперанская. ПМТФ, 1972, 1.
8. W. H. Cust, E. V. Royle. J. Appl. Phys., 1971, 42, 1.
9. Б. Д. Христофоров, А. Н. Аверин.— В сб.: Взрывное дело, № 71/28. М.: Наука, 1972.
10. В. Д. Лютов, И. М. Воскобойников и др.— В сб.: Взрывное дело, № 63/30. М.: Недра, 1967.
11. И. В. Бабайцев, Ю. П. Папанин, В. Ф. Тишевич.— В сб.: Взрывное дело, № 72/29. М.: Недра, 1973.
12. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов, ФГВ, 1967, 3, 2.
13. Таблицы физических величин/Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976.
14. Б. И. Кондриков, В. М. Райкова. ФГВ, 1977, 13, 1.