

ДЕТОНАЦИЯ ПЫЛЕВОГО СЛОЯ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В ВАКУУМИРОВАННЫХ ТРУБКАХ

В. В. Митрофанов, В. А. Субботин

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Исследовалась детонация тонких слоев дисперсных первичных и вторичных взрывчатых веществ (ВВ) на внутренней поверхности стеклянных и пластиковых трубок диаметром $0,6 \div 3$ мм при начальном давлении воздуха внутри трубки от 0,1 МПа до 30 Па. Показано, что в этих условиях воздух почти не влияет на скорость детонации, которая для вторичных ВВ (тэн, гексоген, октоген) меньше или примерно равна скорости $D_{СД}$ детонации Чепмена — Жуге для однородной взвеси тех же веществ. В экспериментах с первичным ВВ (азид свинца) обнаружены режимы с волновой скоростью выше $D_{СД}$, при этом меняется структура зоны реакции. При заполнении трубок со слоем вторичного ВВ взрывчатой газовой смесью наблюдали волны гибридной детонации со скоростью как выше, так и ниже, чем в вакуумированных трубках. В трубках диаметром $2 \div 3$ мм детонация протекала в спиновом режиме во всем диапазоне изменения начального давления, в том числе при скорости выше $D_{СД}$. Сделан вывод, что в вакуумированных трубках с тонким слоем ВВ на стенках перенос воспламенения осуществляется потоком горячих продуктов детонации, движущихся в голове детонационной волны.

ВВЕДЕНИЕ

Детонационная волна (ДВ) в любой гомогенной реагирующей среде представляет собой комплекс из лидирующей ударной волны (УВ) и тесно связанной с ней зоны химических реакций, в которой выделяется тепловая энергия и вырабатывается реактивный импульс для поддержания волны [1]. УВ может быть не плоской и не стационарной [2–4]. В гетерогенных пористых системах и в газовых смесях в стесненном пространстве ударно-волновое инициирование химической реакции может частично или полностью заменяться конвективным, совершающимся за счет проникания струй горячих продуктов в холодную исходную среду [5–7]. Обычно это происходит при пониженных скоростях детонации. Между кристаллами высокочувствительного первичного взрывчатого вещества (ВВ) — азида свинца — установлена возможность передачи инициирующего импульса в вакууме на значительные расстояния (десятки сантиметров) микрочастицами свинца, выбрасываемыми при взрыве [8].

Вблизи пределов детонации газов в трубках существует спиновый режим («спин»), при котором за передним ударным скачком возбуждается поперечная волна (ПВ) [3]. На ПВ выделяется головной участок длиной порядка радиуса трубы с наибольшими значениями давления, плотности и светимости — поперечная

ДВ, движущаяся по слою смеси, сжатой передней УВ, но не успевшей воспламениться. Поперечная ДВ перемещается вблизи стенки трубы по спиральной траектории с шагом, примерно равным диаметру. Остальная часть ПВ представляет собой примыкающую к поперечной ДВ косую ударную волну в продуктах реакции, переходящую в длинный акустический «шлейф» — волну резонансных колебаний продуктов в цилиндрическом объеме трубы. Шаг спина весьма точно вычисляется по акустической теории, что свидетельствует о наличии обратной связи между поперечной ДВ и шлейфом [3, 9]. Спиновые структуры ДВ, как и ячейстые [2, 3], возникают вследствие неустойчивости более простого одномерного течения, описываемого моделью Зельдовича — Неймана — Дёринга [1], и являются по своей природе автоколебательными структурами.

Спиновая детонация наблюдается также в гетерогенных системах, где жидкое или твердое горючее распределено в виде мелкодисперсного распыла в объеме трубы либо жидкая пленка горючего нанесена на стенку, а окислителем служит газообразный кислород или воздух [10–13]. Структура течения в режиме спина в системе газ — пленка имеет наибольшие отличия от структуры в газовых системах: отмечается длинная зона реакции, вмещающая несколько оборотов ПВ без четкого выделения на ней детонационного участка [12].

Во всех известных случаях спиновой детонации существенно взаимодействие течения со стенками трубы, поэтому неизбежны потери энергии и импульса из зоны реакции. Следствием является дефицит скорости относительно классического «идеального» (без потерь) режима Чепмена — Жуге для заряда того же состава с однородным распределением исходных веществ по объему. Кроме того, во всех известных случаях спина важной составляющей исходной взрывающейся среды является газовая фаза: по ней распространяется передняя УВ, подготавливающая воспламенение. Широко распространено мнение, что передняя УВ — неотъемлемая часть всякого детонационного комплекса. Однако недавно было установлено, что детонация существует также во взвесах частиц ВВ в вакууме, где УВ отсутствует, а ее роль могут выполнять движущиеся в голове волны продукты взрыва. При этом развитая для таких систем математическая модель [14, 15] дает скорость детонации, не превышающую скорость Чепмена — Жуге, а в экспериментах с вакуум-взвесью первичного ВВ скорость оказалась выше [16]. При детонации пыли вторичного ВВ в инертной пористой среде наблюдалась детонация с низкой скоростью, слабо зависящая от присутствия воздуха в порах [17].

В связи с этими результатами необходимо было выяснить, при каких условиях в дисперсной вакуумированной взрывчатой системе детонация подчиняется правилу Чепмена — Жуге и при каких не подчиняется, существует ли устойчивая стационарная структура фронта и может ли «вакуумная» детонация протекать в спиновом режиме. Решению этих вопросов для наиболее простой (с позиций экспериментальной реализации) взрывчатой системы и посвящена настоящая работа.

ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовалась детонация в вакуумированных трубках с тонким полупрозрачным слоем частиц ВВ на стенках. Использовали полиэтиленовые трубки с внутренним диаметром $d = 2,3$ мм и толщиной стенки 0,5 мм, а также трубки из кварцевого стекла диаметром $(3 \pm 0,3)$ мм со стенкой 1 мм. Длина трубок $\approx 0,5$ м. Внутреннюю поверхность промывали этиловым спиртом, протирали несколько раз сухой ватной пробкой, затем наносили на нее приблизительно равномерно частицы ВВ —

азида свинца, тэна или гексогена — путем просыпки через наклоненную трубку нескольких порций порошка этого вещества в обоих направлениях при легком постукивании и вращении. Неприставшие к стенкам частицы высыпались. Трубку взвешивали до и после такой операции с точностью 1 мг, что позволяло определять среднюю массу ВВ m на единицу длины. Изменением количества засыпаемого ВВ удавалось менять значение m в пределах $20 \div 260$ мг/м. При этом средняя по объему трубки плотность ВВ (ρ) составляла $5 \div 60$ кг/м³. Частицы тэна, предварительно измельченные в фарфоровой ступке, имели размеры $\delta = 1 \div 30$ мкм с примесью $\approx 30\%$ (по массе) фракции $50 \div 80$ мкм. Порошок гексогена содержал фракции $\delta < 20$ мкм ($< 5\%$), $\delta = 20 \div 30$ мкм ($\approx 40\%$) и $\delta = 100 \div 200$ мкм (остальное). Кристаллы азида свинца имели форму иголок длиной до 30 мкм и толщиной менее 3 мкм.

Кроме трубок, снаряженных по указанной технологии, использовали пластиковые детонационно-волновые трубки (ДВ-трубки) промышленного изготовления, предназначенные для системы неэлектрического взрывания (система «СИНВ» Новосибирского завода «Искра»). Они имели внутренний диаметр 0,6 мм и покрытие из мелкодисперсного октогена с добавкой 5% пудры алюминия при $m = 5 \div 6$ мг/м.

Перед экспериментом воздух из трубки удаляли форвакуумным насосом. Остаточное давление p_0 , контролировавшееся образцовым вакууметром класса 0,4 и термпарным вакууметром, находилось в пределах $20 \div 100$ Па. Часть опытов проводили при более высоких давлениях воздуха, вплоть до атмосферного, а также при замене воздуха ацетиленокислородной или пропанокислородной смесью. Детонационный процесс инициировали высоковольтной электрической искрой с энергией ~ 1 Дж и длительностью разряда ≈ 10 мкс у закрытого конца трубки. Для тэна при $d = 3$ мм эти условия не гарантировали инициирования детонации, поэтому в части опытов использовали дополнительный заряд азида свинца массой ≈ 5 мг, размещенный в присоединенном отрезке пластиковой трубки длиной $2 \div 3$ см. В ДВ-трубке, наполненной взрывчатой газовой смесью, детонация возбуждалась ДВ, переходящей из полиэтиленовой трубки диаметром 2,3 мм с той же газовой смесью без ВВ. Непрерывная фоторегистрация процесса на пленку, движу-

щуюся в перпендикулярном трубке направлении, позволяла фиксировать скорость возникшей взрывной волны и распределение свечения в зоне реакции. Съемку проводили фоторегистратором барабанного типа. На стеклянные трубки накладывали непрозрачный экран с щелью, вырезавшей центральную полосу свечения шириной 1,5 мм. В полиэтиленовых трубках фоторегистрацию вели без ограничения поля свечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При вакуумировании трубок лабораторного снаряжения ($d = 2,3 \div 3,3$ мм) до давления $p_0 < 100$ Па для всех исследовавшихся в ней ВВ регистрировался самоподдерживающийся детонационный процесс со скоростью $D > 1000$ м/с. После некоторого переходного участка скорость D устанавливалась приблизительно постоянной, иногда медленно увеличивалась или уменьшалась. Наблюдались также случаи скачкообразного изменения скорости (см. ниже). В большинстве опытов на фоторегистрограммах отчетливо выявлялась характерная для спинового режима полосатая структура свечения продуктов детонации (рис. 1). Приблизительно вертикальные светлые полосы на снимках — гребни одной и той же вращающейся поперечной волны. ПВ фиксируется на пленке на каждом обороте в фазе минимальной скорости смещения ее изображения, когда обеспечивается наибольшая экспозиция. Подсчет числа светлых полос, выходящих на линию фронта между масштабными метками (горизонтальные темные линии), позволяет найти шаг спина L вдоль образующей трубки. В опыте, представленном на рис. 1,а (полиэтиленовая трубка с частицами тэна), развитие спиновых колебаний происходило постепенно на длине ≈ 20 см от места инициирования одновременно с увеличением скорости ДВ и интенсивности свечения ее фронта. В таких же трубках с частицами гексогена или азида свинца (см. рис. 1,б,г) вне околопредельной области значений m спиновая ДВ всегда устанавливалась на отрезке менее 10 см от точки инициирования. Спин не регистрировался лишь при неустановившихся детонационных процессах с предельно низкими скоростями $1000 \div 1200$ м/с около нижнего предела детонации по количеству ВВ и на начальных участках формирования ДВ. Спин сохранялся и при добавлении воздуха в полость трубки до давления $p_0 = 10^5$ Па

(рис. 1,в,д). При более высоком давлении опыты не проводили.

Изменение начального давления воздуха наиболее заметно сказывается на структуре передней зоны ДВ, предшествующей началу химического разложения ВВ. При малых значениях p_0 УВ удалена от зоны реакции на значительное расстояние и не выделяется при ярком свечении зоны реакции. Видимый на снимках передний край ДВ размыт, его положение зависит от диафрагмы объектива, чувствительности фотопленки и контраста печати. Ближе к зоне реакции свечение постепенно нарастает. В верхней части рис. 1,а зарегистрировано отражение ДВ от прозрачной пробки с узким центральным каналом, использовавшимся для откачки воздуха. В канале возникло яркое свечение еще до подхода к пробке светящейся зоны ДВ, одновременно возникла отраженная УВ. Это свидетельствует о наличии невидимой на фотографии передней зоны ДВ, состоящей из слабо светящихся разреженных газов. При ударе о пробку они сжались, дополнительно нагрелись и часть их вошла в канал. Опережающее свечение отраженной волны регистрируется также на рис. 1,б,г для других ВВ. Согласно снимкам длина невидимой зоны ДВ в вакуумированной системе составляет $(10 \div 20)d$. Колебания газа, связанные с ПВ, присутствуют и в этой зоне, сохраняясь за отраженной волной (рис. 1,г). С увеличением начального давления растет интенсивность свечения воздуха непосредственно за УВ, невидимая зона исчезает, УВ приближается к зоне реакции.

Различие между первичным и вторичными ВВ проявляется в некоторых особенностях течения в зоне реакции, регистрируемых на фоторазвертках. Для системы с тэном и гексогеном (см. рис. 1,а-в) свечение и угол наклона ПВ меняются вдоль осевой координаты Z плавно до расстояний не менее $50d$, на ПВ нет чем-либо отличающегося участка, который можно было бы выделить как детонационный (поперечная ДВ). Для системы с азидом свинца вблизи предела детонации по количеству ВВ вид фоторазверток такой же. Но при удалении от детонационного предела картина качественно меняется (см. рис. 1,г,д). Во-первых, во фронте детонации вакуумированной системы появляется светлая зона повышенного свечения с достаточно четкой задней границей, отделяющей ее от области последующего течения. Во-вторых, на задней границе светлой зоны ПВ претерпевает излом. Видно, что

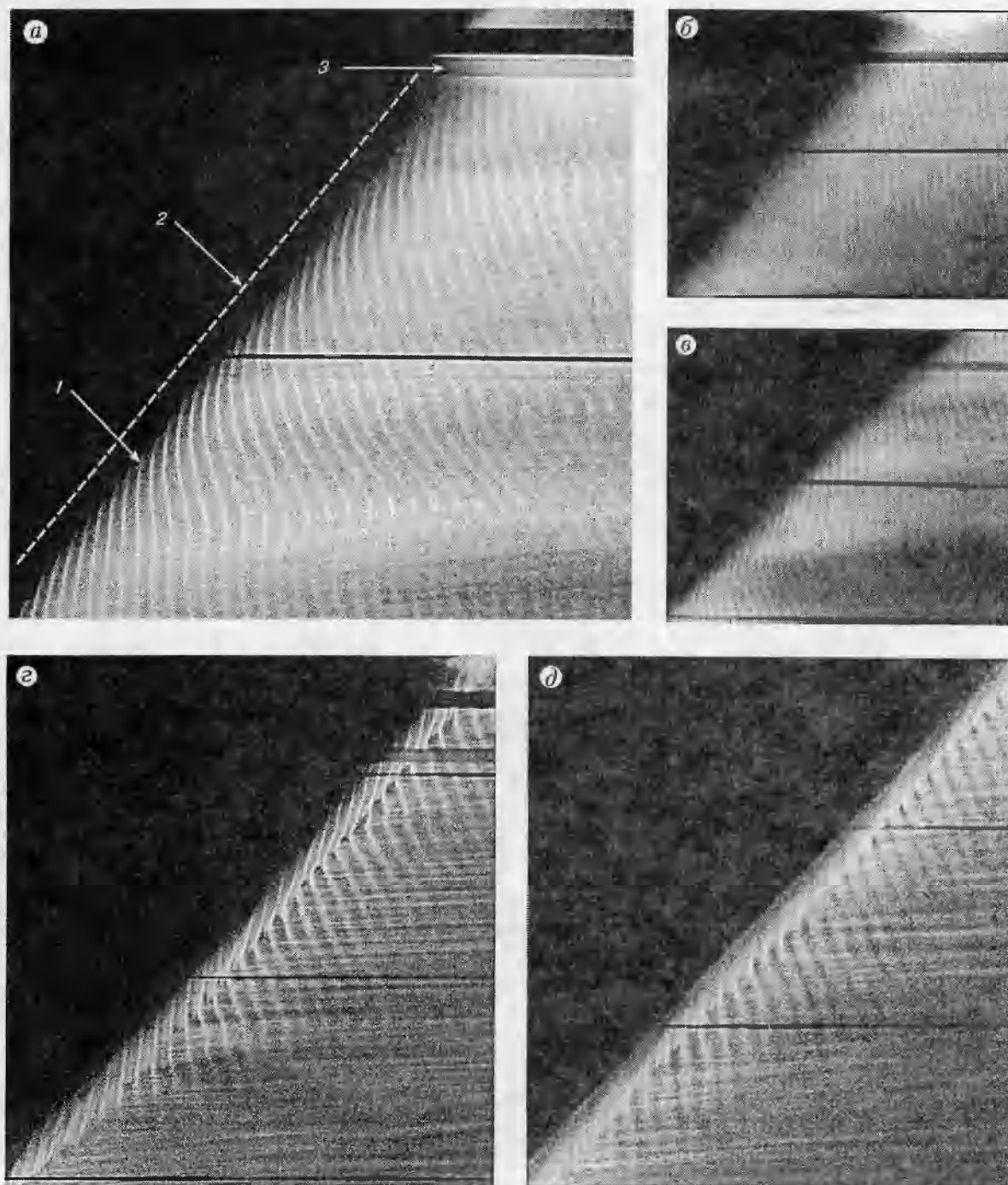


Рис. 1. Фоторазвертки детонации пылевого слоя ВВ в узких трубках ($d = 2,3$ мм, полиэтилен):

a — тэн, $m = 0,69$ мг/см, $p_0 < 100$ Па, $D = 1930$ м/с, 1 — ПВ, 2 — траектория УВ, 3 — отраженная волна; *б* — гексоген, $m = 1,55$ мг/см, $p_0 < 100$ Па, $D = 1840$ м/с; *в* — тэн, $m = 0,48$ мг/см, $p_0 = 10^5$ Па, $D = 1660$ м/с; *г* — азид свинца, $m = 0,77$ мг/см, $p_0 < 100$ Па, $D = 1730$ м/с; *д* — азид свинца, $m = 0,82$ мг/см, $p_0 = 2 \cdot 10^4$ Па, $D = 1750$ м/с; метки (тонкие горизонтальные линии) через 100 мм

Таблица 1

Параметры детонации пылевого слоя ВВ в трубках

| № опыта | ВВ | d , мм | Материал трубки | m , мг/см | ρ , кг/м ³ | p_0 , Па | D_{exp} , м/с | $L/\pi d$ |
|---------|------------------|----------|-----------------|-------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|-----------|
| 1 | ТЭн | 3,1–3,3 | Стекло | 0,8–1,0 | 10–13 | < 100 | 2150 ± 100 | 1,1 |
| 2 | | 3,0 | » | 0,4 | 5,5 | 10 ⁵ | 1900 ± 100 | 1,0 |
| 3 | | 2,3 | Полиэтилен | 0,7–1,2 | 17–30 | < 100 | 1790 ± 130 | 0,9 |
| 4 | | 2,3 | » | 0,4–0,5 | 9–12 | 10 ⁵ | 1780 ± 150 | 1 ± 0,1 |
| 5 | Гексоген | 3,3 | Стекло | 1,6 | 19 | < 100 | 1940 ± 100 | 1 ± 0,1 |
| 6 | | 2,3 | Полиэтилен | 1,3–1,5 | 31–36 | 10 ⁵ | 1680 ± 200 | 0,95 |
| 7 | | 2,3 | » | 1,4 | 33 | 5 · 10 ⁴ | 1750 ± 100 | 1,0 |
| 8 | | 2,3 | » | 1,5 | 36 | 2 · 10 ⁴ | 1600 ± 100 | 0,8 |
| 9 | | 2,3 | » | 2,5 | 60 | 2 · 10 ⁴ | 1720 ± 100 | 0,9 |
| 10 | | 2,3 | » | 1,6–2,6 | 40–62 | < 100 | 1720 ± 120 | 0,9 |
| 11 | | 2,3 | » | 0,67 | 16 | < 100 | 1080 ± 100 | — |
| 12 | PbN ₆ | 2,7–2,8 | Стекло | 0,4–0,55 | 7–9 | < 100 | 1300 ± 50 | 1,1 |
| 13 | | 2,3 | Полиэтилен | 0,6 | 15 | 10 ⁵ | 1420 → 1550 → 1800 | 1,1 |
| 14 | | 2,3 | » | 0,8 | 20 | 2 · 10 ⁴ | 1700 ± 100 | 1,07 |
| 15 | | 2,3 | » | 0,8 | 20 | 9 · 10 ³ | 1720 ± 150 | 1,25 |
| 16 | | 2,3 | » | 0,7 | 17 | 5 · 10 ³ | 1720 ± 120 | 1,15 |
| 17 | | 2,3 | » | 0,7–0,8 | 17–20 | < 100 | 1750 ± 100 | 1,08 |
| 18 | | 2,3 | » | 0,23 | 5,5 | < 100 | 1340 → 1080 | 1,0 |

структура волны в окрестности излома имеет какие-то особенности, иногда напоминающие поперечную ДВ при спиновой детонации газов [3]. При последовательном увеличении давления p_0 в серии опытов сокращается расстояние X между УВ и задней границей светлой зоны ДВ. Измерения в полиэтиленовых трубках дали значения $X = 43, 35, 27, 21$ и 7 мм при $p_0 = 50, 5 \cdot 10^3, 9 \cdot 10^3, 2 \cdot 10^4$ и 10^5 Па соответственно. При атмосферном давлении светлая зона не выделяется и X определено по изломам ПВ.

Чтобы проверить, не связаны ли наблюдаемые особенности ДВ в трубках с азидом свинца с превышением критической толщины слоя для его самостоятельной детонации, делались попытки возбудить детонацию таких же слоев на открытой внутренней поверхности полцилиндрических желобков, получающихся при разрезании полиэтиленовой трубки вдоль образующих на две половины. Электроискрой или взрывом кусочка азид свинца массой ≈ 5 мг возбудить детонацию слоя в таких условиях не удалось. Следовательно, толщина слоев ВВ даже в случае азид свинца была меньше критической для самостоятельной детонации, и распространение ДВ в вакуумированных трубках

могло поддерживаться только за счет переноса инициирующего импульса потоком продуктов (газов и/или конденсированных частиц) внутри полости.

Различие процессов в полиэтиленовых и в стеклянных трубках проявлялось в изменении кривизны ПВ при удалении назад от фронта. В полиэтиленовых трубках наблюдалось монотонное искривление ПВ (см. рис. 1,а). После опыта стенки некоторых трубок имели локальные разрывы («прожоги»), обычно без разделения трубки на куски. В стеклянных трубках знакопеременное искривления ПВ вдали от фронта не наблюдалось, по форме ПВ были близки к прямым, как на рис. 1,б. Разрушение стеклянных трубок происходило при $m > 1$ мг/см и вызывало обрыв свечения на расстоянии $10 \div 20$ см от фронта.

В табл. 1 содержатся основные количественные данные экспериментов. Строки, где указан интервал исходных величин m и ρ , относятся к группам из 2–4 опытов, остальные строки — к единичным опытам. Приведены измеренные скорость детонации D_{exp} и шаг спина L , отнесенный к длине окружности. Указанные максимальные отклонения измеренной скорости от средней охватывают как измене-

Таблица 2

Скорость детонации в ДВ-трубке с разными газами
($d = 0,6$ мм, октоген + 5% Al, $m = 5 \div 6$ мг/м,
 $\rho = (20 \pm 2)$ кг/м³)

| Газ | p_0 , Па | D_{exp} , м/с | Результат опыта |
|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Воздух | 10^5 | 1540 | + |
| | < 100 | 1490 | + |
| $C_2H_2 + O_2$ | 10^5 | 2770 | + |
| | $2 \cdot 10^4$ | 2440 | - |
| $C_3H_8 + 5 O_2$ | 10^5 | 1860/1730 | + |
| | $2 \cdot 10^4$ | 1180 | + |

Примечание. + горение ВВ, - горение ВВ отсутствует.

ния скорости вдоль трубки в единичных опытах, так и ее отличия в разных опытах. Точность измерения составляла $\approx 3\%$. Определенной зависимости D_{exp} от m и ρ в значительных интервалах их изменения не выявлено: в некоторых опытах при значениях m , соответствующих верхней границе указанного интервала (опыты 3 и 10), регистрировалась скорость ниже, чем у нижней границы этого интервала. Лишь в области минимальных, околопредельных для детонации значений m наблюдалось существенное снижение скорости (опыты 11, 12 и 18). В опыте 18 уменьшение скорости произошло в середине трубки. В опыте 13 скорость дважды возросла скачком на расстояниях 270 и 80 мм от конца трубки соответственно. Вероятно, изменения скорости детонации связаны с неравномерным распределением ВВ по длине трубки, хотя достоверно такая связь не установлена.

Результаты экспериментов с ДВ-трубкой ($d = 0,6$ мм) приведены в табл. 2, несколько фоторегистрограмм — на рис. 2. После откачки воздуха в канале трубки распространяется такая же стабильная ДВ, как и в трубке с воздухом при атмосферном давлении (спикки *a, б*). При этом скорость детонации почти не снижается. Длина зоны реакции, определяемая на фоторазвертках как размер области интенсивного свечения в направлении оси трубки, также приблизительно сохраняется, составляя $50 \div 60$ мм ($\approx 100d$). Свечение ДВ очень яркое, несмотря на малый диаметр канала, что, по-видимому, обусловлено горением алюминия. Признаки спина не обнаружены.

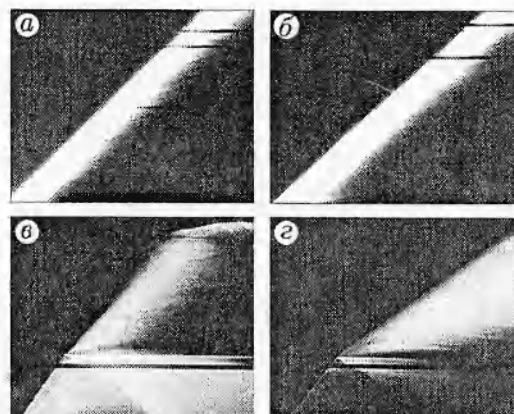


Рис. 2. Фоторазвертки детонации в ДВ-трубке ($d = 0,6$ мм) при разном газовом наполнении:

a — воздух, $p_0 = 10^5$ Па; *б* — вакуумирование до $p_0 < 100$ Па; *в* — $C_3H_8 + 5 O_2$, $p_0 = 10^5$ Па; *г* — $C_3H_8 + 5 O_2$, $p_0 = 2 \cdot 10^4$ Па; *в, г* — ДВ переходит в ДВ-трубку из трубки диаметром 2,3 мм без ВВ

После замены воздуха в ДВ-трубке эквимолярной ацетиленокислородной смесью с собственной скоростью детонации выше 2800 м/с зарегистрированы волны газовой детонации без воспламенения ВВ (при $p_0 = 2 \cdot 10^4$ Па) и гибридной детонации с четко фиксируемым горением ВВ за фронтом газовой ДВ (при $p_0 \approx 10^5$ Па). Скорость ДВ в обоих случаях высокая и определяется газовой смесью (см. табл. 2).

После заполнения канала ДВ-трубки пропанокислородной смесью при $p_0 = 10^5$ Па (при этом ее скорость детонации в иницирующей трубке была 2320 м/с) наблюдался режим гибридной детонации с двумя постепенно разделяющимися фронтами: $D_1 = 1870$ м/с и $D_2 = 1730$ м/с (см. рис. 2, *в*). Более слабое свечение первого фронта, видимо, соответствует газовой детонации, отстающего второго фронта — детонационному горению ВВ, хотя его скорость выше скорости детонации в ДВ-трубке с воздухом. Снижение давления газовой смеси до $p_0 = 2 \cdot 10^4$ Па привело к переходу ДВ в иницирующей трубке в спиновый режим со скоростью $D = 2080$ м/с и появлению в ДВ-трубке нового режима низкоскоростной гибридной детонации со скоростью $D = 1180$ м/с (см. рис. 2, *г*). Последняя существенно меньше скорости детонации в заполненной воздухом или вакуумированной ДВ-трубке и соответствует низкоскоростной газовой детонации, исследовавшейся в работе [18]. Однако в данном случае в ДВ вместе с газом происходит горение дисперсного конден-

Таблица 3

Параметры детонации Чепмена — Жуге (расчет)

| ВВ | $\rho_{ВВ}$, кг/м ³ | p_0 , Па | $D_{СД}$, м/с | $p_{СД}$, МПа | T , К | M , г/моль |
|------------------|---------------------------------|------------|----------------|----------------|---------|--------------|
| ТЭн | 5 | 10^5 | 2112 | 12,9 | 3632 | 27,2 |
| | 5 | 0 | 2186 | 11,2 | 3726 | 26,0 |
| | 10 | 0 | 2208 | 22,7 | 3833 | 26,3 |
| | 20 | 0 | 2230 | 46,4 | 3943 | 26,5 |
| | 30 | 0 | 2242 | 69,8 | 4003 | 26,6 |
| Гексоген | 10 | 10^5 | 2380 | 29,3 | 3989 | 23,6 |
| | 10 | 0 | 2380 | 26,2 | 3981 | 23,5 |
| | 30 | 0 | 2410 | 80,5 | 4141 | 23,8 |
| | 60 | 0 | 2426 | 162 | 4233 | 24,1 |
| PbN ₆ | 5 | 10^5 | 1292 | 4,68 | 2989 | 59,1 |
| | 5 | 0 | 1329 | 3,85 | 3810 | 73,0 |
| | 10 | 0 | 1328 | 7,70 | 3817 | 73,1 |
| | 20 | 0 | 1328 | 15,4 | 3830 | 73,4 |
| Октоген + 5% Al | 20 | 0 | 2385 | 53,0 | 4234 | 24,4 |

сированного ВВ без видимого разделения фронтов. После повторного заполнения «отработавшей» в этом режиме ДВ-трубки новой такой же порцией газовой смеси в ней инициировался режим газовой низкоскоростной детонации со скоростью 1400 м/с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемая детонирующая система имеет специфическую исходную структуру, в которой распределение ВВ по сечению «заряда» крайне неоднородно. Кроме того, при малых поперечных размерах существенно взаимодействие развивающегося в ДВ течения со стенками трубки. Поэтому не было оснований ожидать, что параметры детонации будут соответствовать «идеальным» параметрам Чепмена — Жуге, вычисленным для однородного заряда с одномерной стационарной зоной реакции без всяких потерь. Тем не менее, интересно сопоставить реальные параметры с идеальными. В табл. 3 приведены расчетные значения скорости $D_{СД}$, давления $p_{СД}$, температуры T и средней молекулярной массы M продуктов в точке Чепмена — Жуге для однородных зарядов исследуемых ВВ. Значения плотности ВВ $\rho_{ВВ}$ заданы близкими к среднеобъемным в экспериментах. Расчеты выполнены с помощью вычислительной программы [19] в предположении термодинамически равновесного состава продуктов.

Сравним данные табл. 1–3 по скоростям

детонации. Для тэна в полиэтиленовых трубках, для гексогена во всех опытах и для октогена с добавками алюминия в ДВ-трубке без взрывчатой газовой смеси, а также для азид свинца при малых значениях m (вблизи предела детонации) $D_{exp} < D_{СД}$. Здесь дефицит скорости можно объяснить потерями импульса ДВ за счет трения и расширения стенок при достаточно длинной зоне реакции. Расширение полиэтиленовых трубок на длине зоны реакции вторичных ВВ существенно: элементарная оценка радиального смещения стенок под действием внутреннего давления, равного $p_{СД}$, дает несколько десятых миллиметра за 10 мкс, т. е. на длине нескольких десятков начальных калибров канал трубки мог удваиваться по ширине. Для тэна же в более жестких и массивных стеклянных трубках практически выполняется равенство $D_{exp} = D_{СД}$. А для азид свинца при увеличении количества ВВ даже в нежесткой полиэтиленовой трубке (опыты 13–17 в табл. 1) скорость детонации оказывается существенно выше «идеальной» скорости Чепмена — Жуге, несмотря на несомненное присутствие потерь на стенках и в этих опытах. Переход на режим с повышенной скоростью ($D_{exp} > D_{СД}$) в трубках с азидом свинца сопровождался уже отмеченным появлением светлой зоны в области фронта и изломов ПВ на ее задней границе.

Присутствие воздуха в трубке мало влияет как на экспериментальные, так и на расчетные скорости детонации. В расчетах, опериру-

ющих только начальным и конечным состояниями среды без учета потерь в зоне реакции, такой результат понятен, поскольку массовая доля воздуха во всех случаях была небольшой даже при атмосферном давлении в канале. Однако слабое влияние воздуха на реальную скорость ДВ нельзя было априори уверенно прогнозировать, так как воздух посредством возникающей в нем УВ в принципе мог влиять на механизм инициирования частиц ВВ, а через него на длину зоны реакции с соответствующими потерями и, следовательно, на скорость детонации. Напомним, что ранее при исследовании детонации относительно толстых слоев азида свинца ($\approx 0,2$ мм) в стальном канале было зарегистрировано изменение скорости ДВ более чем в два раза в области $D_{exp} > D_{СД}$ при варьировании начального газового давления в окрестности атмосферного и ниже [20]. Вместе с тем для пыли вторичных ВВ в инертной пористой среде наблюдалась детонация с низкой скоростью, слабо зависящей от присутствия воздуха в порах [17].

В обсуждаемых экспериментах при $p_0 < 100$ Па давление ударного скачка в полости трубки перед ДВ не превышало $3 \cdot 10^3$ Па и было на 3–4 порядка ниже давления продуктов взрыва в самой ДВ, поэтому присутствие остаточного воздуха и УВ не могло существенно влиять на движение продуктов взрыва. Не имея спереди достаточного противодействия воздуха, продукты проникали в область перед зоной реакции и осуществляли вместо УВ подготовку частиц ВВ к воспламенению. Как и при детонации многих других малоплотных гетерогенных систем, инициирование химических реакций здесь обеспечивалось нагревом частиц ВВ потоком горячих газов (с сопутствующими фазовыми переходами и, быть может, дополнительным диспергированием) [5–7, 21]. При этом конвективный тепловой поток, генерируемый УВ при низких значениях p_0 , недостаточен для быстрого нагрева и зажигания ВВ (даже азид свинца), что подтверждается наличием передней невидимой зоны в ДВ. Плотность же облака продуктов взрыва перед зоной реакции и тепловые потоки из него в частицы на порядки больше. Поэтому проникающие в головную часть ДВ продукты реакции играли доминирующую роль в инициировании химической реакции. Весьма слабое влияние давления p_0 на скорость ДВ в данных экспериментах, как и в [17], по-видимому, означает, что такая роль горячих продуктов сохранялась до атмосфер-

ного давления воздуха в канале при исследованных параметрах зарядов. А сильное влияние p_0 на значения D_{exp} в опытах работы [20] с относительно толстыми слоями азид свинца объясняется другим диапазоном скоростей УВ ($5 \div 14$ км/с), благоприятным для реализации инициирования ВВ лидирующей УВ в канале при $p_0 = 10^4 \div 10^5$ Па, и большей энергией ВВ, достаточной для создания и поддержания УВ с этими скоростями.

В случае азид свинца необходимо учитывать также принципиальную возможность переноса фронта инициирования высокоскоростными микрочастицами свинца, выбрасываемыми при детонации отдельных кристаллов ВВ и способными при попадании вызывать детонацию других кристаллов [8]. Однако действие такого механизма инициирования в наших опытах должно было бы приводить к заметному снижению скорости ДВ с ростом начального давления из-за уменьшения пути торможения и скорости микрочастиц. Кроме того, оно наверняка обеспечивало бы передачу инициирования между соседними кристаллами ВВ в слое и, следовательно, собственную детонационную способность слоя вне замкнутого пространства трубки, что в действительности не имело места (см. выше). Представляется, что в условиях обсуждаемых опытов отдельные кристаллы азид свинца из-за их малого размера сами не детонировали, а сгорали в потоке обдувающего их газа за времена, существенно большие времени пробега звуковой волны по кристаллу. Детонацией являлся процесс взрыва системы в целом, но не отдельных частиц ВВ (типичная ситуация для детонации гетерогенных систем). Поэтому из зоны реакции не могли выбрасываться способные к инициированию микрочастицы свинца, как при детонации более крупных кристаллов, изучавшихся в [8]. Кроме того, опережающее газовое облако продуктов должно образоваться и при детонации слоя более крупных самостоятельно детонирующих частиц ВВ в вакуумированной трубке, тогда конвективно-тепловой механизм переноса инициирования этим облаком может конкурировать с инициированием за счет ударов высокоскоростных частиц (когда они есть). По-видимому, оба механизма проявлялись в экспериментах работы [16], где при детонации вакуум-взвеси более крупных частиц азид свинца отмечались локальные микровзрывы внутри фронта волны.

С учетом изложенных соображений, а так-

же имеющейся математической модели для заряда однородной вакуум-взвеси [14, 15] структура и механизм детонации в вакуумированной системе рассматриваемого типа представляются следующими. На стадии формирования ДВ в ее передней части образуется газовый предвестник из продуктов взрыва с убывающими по координате Z давлением и плотностью, вплоть до вакуума или состояния за УВ (если впереди есть остаточный воздух). Поток горячих газов в предвестнике, движущихся в среднем со скоростью ДВ, срывает частицы ВВ со стенки, образуя пристеночный слой газозвеси, затем нагревает частицы или их пары до воспламенения с возможным промежуточным плавлением, дроблением, испарением (в зависимости от свойств ВВ). Распределение параметров среды внутри предвестника определяется силовым и тепловым взаимодействием газа, частиц и стенок трубки, которая под давлением продуктов может расширяться. Поперечная волна, возникающая в зоне реакции, проникает в предвестник, интенсифицируя подготовительные процессы, как и процесс последующего горения. В случае вторичных ВВ к концу достаточно протяженной зоны химической реакции достигается полное перемешивание продуктов в сечении трубки, и скорость детонации определяется обычным правилом Чепмена — Жуге с учетом потерь на стенках. Поэтому ее величина не выше идеальной $D_{СЖ}$, как это наблюдалось в большинстве проведенных экспериментов.

В случае же использования высокочувствительного первичного ВВ (азида свинца) химическая реакция протекает и заканчивается в пристеночном слое газозвеси до его распространения на все сечение, быть может, в поперечной ДВ. Продукты реакции, сталкиваясь в осевой области, образуют переднюю и заднюю струи, как при детонации трубки из сплошного ВВ [22]. Передняя струя восполняет потери газа из предвестника, уносимые пристеночным двухфазным пограничным слоем. Эта струя и определяет в основном скорость ДВ, которая оказывается больше рассчитанной по правилу Чепмена — Жуге, не имеющему отношения к данному случаю. По-видимому, аналогичный эффект неоднородной структуры течения имел место и в опытах с тэном в стеклянных трубках, где он компенсировал уменьшение скорости ДВ, связанное с потерями на стенках.

Продолжение ПВ от зоны реакции вперед

в газовое облако-предвестник, где среднemasовая скорость течения относительно ДВ существенно дозвуковая (близка к нулю), является специфической особенностью спиновой детонационной структуры в вакуумированной системе. Эту часть ПВ можно назвать передним шлейфом, поскольку она представляет собой, как и обычный задний шлейф в продуктах реакции, волну вынужденных колебаний, которая возбуждается движущейся в зоне реакции активной (квазидетонационной) частью ПВ. Ни в каких ранее изученных случаях спиновой детонации переднего шлейфа нет, так как зона реакции там начинается близко к фронту головной ударной волны (в области ее сопряжения с ПВ).

Другим характерным свойством спиновой детонации рассматриваемых систем, отличающим их от газовых, но объединяющим с гетерогенными системами типа газ — пленка [12], является растянутая по координате Z зона реакции и соответственно удлиненная активная часть ПВ. Это может быть обусловлено тремя причинами:

а) различные частицы ВВ (топлива) срываются со стенки и проходят подготовительную стадию к вступлению в реакцию на различных расстояниях Z относительно фронта волны с «разбросом» $\Delta Z > d$;

б) горение отдельных частиц (или унос массы с них в интегрированную зону реакции) продолжается в течение нескольких оборотов ПВ в зоне $\Delta Z > d$;

в) даже мгновенно сгорающие в ПВ частицы при достаточно медленном ускорении в газовом потоке смещаются относительно ДВ на расстояние $Z \approx L \approx 3d$ за время одного оборота ПВ.

По последней причине длина поперечной ДВ не может быть меньше $3d$, если поперечная детонация имеет место. Перечисленные причины могут действовать совместно и растягивать зону реакции до длины $Z \gg d$. Наиболее короткая зона реакции, где не исключено существование поперечной ДВ, в системе с азидом свинца. Здесь зона реакции предположительно совпадает с отмеченной выше светлой зоной. При атмосферном давлении она минимальна и согласно снимкам составляет $\sim 3d$, что совпадает со сделанной минимальной оценкой длины поперечной ДВ. При более низких давлениях предполагаемая зона реакции расширяется вперед за счет более раннего срыва со стенки и воспламенения самых мелких ча-

стиц ВВ в области предвестника. В системах с тэном и гексогеном, где не зарегистрировано выраженной детонационной зоны в поперечной волне, горение ВВ происходит в области $\Delta Z \approx 50 \text{ см} \approx 20d$, периодически интенсифицируясь с частотой вращения ПВ. Активный участок ПВ (с химическим тепловыделением) здесь переходит в передний и задний шлейфы постепенно, не имея четкой границы. Примерно такую же абсолютную протяженность имеет бесспиновая зона горения октогена с алюминием в ДВ-трубке.

Немонотонное искривление задних шлейфов при удалении от фронта (см. рис. 1, 2) объясняется неравномерным радиальным расширением трубки и соответствующими изменениями угловой скорости поперечной звуковой волны. Неравномерность расширения косвенно подтверждается локальными разрывами стенки; она может быть вызвана местными колебаниями величины m , а также неустойчивостью однородной радиальной деформации материала стенки типа наблюдаемой, например, при раздутии цилиндрических резиновых баллонов.

Очевидно, детонационный спин является, как и в ранее исследованных системах, автоколебательным процессом в условиях неустойчивости более простого осесимметричного течения в ДВ. Обращает на себя внимание значенные отношения $L/\pi d = 1 \pm 0,2$ (см. табл. 1). Такой шаг спина характерен для газовых смесей и весьма точно предсказывается акустической теорией Мансона [3, 9]. Однако с позиций этой теории следовало ожидать $L/\pi d \approx 1,3$ в спиновой ДВ, движущейся в 1,3 раза быстрее волны Чепмена — Жуге (опыты 13–17 в табл. 1), так как при этом средняя в поперечном сечении температура продуктов и вместе с ней частота акустических поперечных колебаний не должны увеличиваться. В действительности средний относительный прирост отношения $L/\pi d$ оказывается вдвое меньше, чем увеличение $D_{exp}/D_{СД}$. Причины такого несоответствия пока непонятны. Усовершенствованный в [23] метод расчета частоты спина, учитывающий непостоянство параметров течения по Z в зоне реакции и давший хорошие результаты при описании детонационного спина в газопленочной системе, опирается на значения параметров передней УВ и потому неприменим, к сожалению, для вакуумированных систем. Здесь требуются новые теоретические подходы.

Отсутствие спиновых явлений при детона-

ции октогена с алюминием в ДВ-трубке, вероятно, обусловлено слишком малым диаметром канала, ведущим к несоразмерности характерного времени реакции и периода собственных поперечных колебаний реагирующей среды. Можно предполагать, что в опытах с тем же взрывчатым составом в трубках большего диаметра спин будет обнаружен. Заметим, что фотографическое разрешение в настоящих опытах было достаточным для обнаружения спина в ДВ-трубке, так как для газовой смеси в таких же трубках без ВВ спин фиксировался.

Представляет интерес низкоскоростная гибридная детонация, обнаруженная в ДВ-трубке с пропанокислородной смесью. Непонятно, почему она распространяется медленнее, чем ДВ в такой же вакуумированной трубке или в ДВ-трубке с воздухом. Ведь газовая смесь имеет значительно более высокую собственную скорость идеальной детонации и, казалось бы, должна увеличивать реакционную способность всей системы. Результат эксперимента означает, что в отношении гетерогенных систем такая логика не всегда верна. Возможное его объяснение состоит в том, что в наблюдаемом взрывном комплексе пламя волны низкоскоростной газовой детонации несколько опережает волну основной реакции в порошке, флегматизируя при этом порошок за счет оплавления самой мелкой фракции и острых углов частиц; последующее горение порошка затягивается и не может развить достаточный импульс для разгона гибридной ДВ. Флегматизация дисперсного ВВ волной газовой детонации в определенном диапазоне начальных давлений уже отмечалась ранее в экспериментах по инициированию тэна [24]. Наблюдавшиеся в ДВ-трубке режимы высокоскоростной гибридной детонации (скорость не ниже скорости детонации в трубке с воздухом) принципиально не отличаются от исследованных ранее в других системах [25, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано существование детонации очень тонких слоев взрывчатых веществ в вакуумированных трубках, где единственно возможным является конвективный механизм переноса воспламенения — струями горячих продуктов, движущихся в полости трубы.

2. Показано, что в этих условиях при отсутствии переднего ударного скачка волна детонации может быть спиновой. При этом шаг

спиральной траектории головы спина равен примерно трем диаметрам трубки, как в газовых смесях.

3. Установлено, что в трубках малого диаметра $d < 3,3$ мм начальное давление воздуха в интервале от нуля до атмосферного мало влияет на скорость детонации, которая может быть как ниже, так и выше скорости Чепмена — Жуге для испытываемой системы. Для первичного ВВ (азид свинца) обычно $D > D_{CJ}$, для вторичных — $D \leq D_{CJ}$.

4. Впервые обнаружено, что спиновая детонация может распространяться со скоростью выше D_{CJ} .

5. При заполнении трубок со слоем вторичного ВВ на стенках взрывчатой газовой смесью реализуются волны гибридной детонации, как высокоскоростные, так и низкоскоростные, со скоростями, лежащими в интервале от D_0 до $D_0/2$, где D_0 — скорость детонации Чепмена — Жуге газовой смеси.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01682).

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. Теория детонации. М.: Гостехиздат, 1955.
2. Щелкин К. И., Трошин Я. К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
3. Войцеховский Б. В., Митрофанов В. В., Топчиян М. Е. Структура фронта детонации в газах. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963.
4. Дремин А. Н., Савров С. Д., Трофимов В. С., Шведов К. К. Детонационные волны в конденсированных средах. М.: Наука, 1970.
5. Переход горения конденсированных систем во взрыв / А. Ф. Беляев, В. К. Боболев, А. И. Коротков, А. А. Сулимов, С. В. Чуйко. М.: Наука, 1973.
6. Соловьев В. С., Аттетков А. В., Бойко М. М. и др. Экспериментальное исследование механизма возбуждения детонации в низкоплотных ВВ // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 88–92.
7. Митрофанов В. В. Детонационные волны в гетерогенных средах: Учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1988.
8. Беляев А. Ф., Харитон Ю. Б. О передаче детонации между иницирующими взрывчатыми веществами. I. Общая картина наблюдаемых явлений // ЖЭТФ. 1937. Т. 6, вып. 8. С. 870–876.
9. Manson N. Propagation des detonations et des deflagrations dans les melanges gazeux // L'Office National d'Etudes et des Recherches Aeronautique. Paris, 1947.
10. Strauss W. A. Investigation of the detonation of aluminium powder-oxygen mixtures // AIAA Journal. 1968. V. 6, N 9. P. 1753–1756.
11. Bowen J. R., Ragland K. W., Steffes F. J., Loffin T. G. Heterogeneous detonation supported by fuel fogs or films // 13th Intern. Symp. on Combustion. 1971. P. 1131–1139.
12. Пинаев А. В., Митрофанов В. В. Спиновая детонация в гетерогенной системе типа газ-пленка // Докл. АН СССР. 1975. Т. 225, № 3. С. 613–616.
13. Zhang F., Gronig H. Detonability of Organic Dust-Air Mixtures // Prog. Astronaut. and Aeronaut. 1993. V. 154. P. 195–215.
14. Ждан С. А. Структура детонационных волн в вакууме с частицами унитарного топлива // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 6. С. 109–115.
15. Ждан С. А., Прохоров Е. С. Детонация свободного заряда взвеси частиц унитарного топлива в вакууме // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 3. С. 86–94.
16. Митрофанов В. В., Бакиров И. Т. Детонация взвеси частиц чувствительного ВВ в вакууме // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 2. С. 122–124.
17. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Низкоскоростная детонация ВВ в вакуумированной пористой среде // Докл. РАН. 1992. Т. 325, № 3. С. 498–501.
18. Манжалеи В. И. Режимы детонации газа в капиллярах // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 3. С. 93–100.
19. Трусев Б. Г. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах (Программа АСТРА.4/рс, версия 1:07). М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана, 1991.
20. Бакиров И. Т., Митрофанов В. В. Высокоскоростная двухслойная детонация в системе ВВ — газ // Докл. АН СССР. 1976. Т. 231, № 6. С. 1315–1318.
21. Григорьев В. В., Лукьянчиков Л. А., Пруэл Э. Р. Поджигание частиц тэна волной газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 2. С. 133–138.
22. Лобанов В. Ф., Фадеенко Ю. И. Кумуляция продуктов детонации полого цилиндрического заряда // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10, № 1. С. 119–124.
23. Пинаев А. В. Колебания в неоднородной среде и природа спиновой газопленочной детонации // ПМТФ. 1987. № 1. С. 124–133.

24. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А., Митрофанов В. В., Тесленко В. С. Иницирование порошкообразных взрывчатых веществ газовой детонацией // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 16, № 5. С. 153–155.
25. Pierce T. H., Nicholls J. A. Two-phase detonations with bimodal drop distributions // Astronaut. Acta. 1972. V. 17, N 4 & 5. P. 703–713.
26. Khasainov B. A., Veysiére B. Effect of losses on the existence of nonideal detonations in hybrid two-phase mixtures // Dynamic Aspects of Detonation / A. L. Kuhl, J.-C. Leyer, A. A. Borisov, and W. A. Sirignano. (Eds). Progr. Astronaut. and Aeronaut. 1993. V. 153. P. 447–461.

Поступила в редакцию 25/XII 1997 г.
