

УДК 532.529:518.5

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЗВЕСЯХ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА В РЕЗКО РАСШИРЯЮЩИХСЯ ТРУБАХ

А. Г. Кутушев<sup>1</sup>, В. Ф. Бурнашев<sup>2</sup>, У. А. Назаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень

<sup>2</sup>Комплексный научно-исследовательский институт региональных проблем Самаркандского отделения АН Республики Узбекистан, 703000 Самарканд, Узбекистан, umaralin@rambler.ru

В рамках уравнений двумерного осесимметричного нестационарного движения реагирующей смеси газа и частиц унитарного топлива выполнено математическое моделирование механизмов распространения волн горения и гетерогенной детонации в резко расширяющихся трубах. Изучено влияние основных определяющих параметров газовзвесей и трубопровода на распространение нестационарных детонационных волн. Приведены зависимости критического отношения диаметров труб составного трубопровода от относительного массового содержания частиц унитарного топлива разного размера.

Ключевые слова: горение, детонация, ударная волна, детонационная волна, фронт горения частицы, унитарное топливо, трубопровод, массовое содержание частиц.

### ВВЕДЕНИЕ

Вопросам динамики волн горения и взрыва в газопылевых средах посвящены многочисленные исследования. В [1, 2] представлен обзор некоторых работ в области механики реагирующих инертных сред, в которых рассмотрены одномерные и двумерные стационарные и нестационарные детонационные течения смесей газа и реагирующих твердых частиц (алюминий, уголь).

В [3] предложены физико-математическая модель и технология численных расчетов ударно-волновых и детонационных процессов в гетерогенных смесях газа и мелких реагирующих частиц в каналах сложной геометрии. Исследованы процессы распространения ударных и детонационных волн в газовзвесах частиц алюминия в кислороде в плоском канале с внезапным расширением. Выявлено, что при выходе детонационной волны из узкой части канала возможны различные варианты развития течения от непрерывного распространения до полного срыва гетерогенной детонации, а также частичного срыва с последующим реиницированием. Установлено влияние размера частиц и геометрических параметров на процесс.

В [4] численно исследованы процессы ди-

фракции плоской детонационной волны в газовзвеси в плоском канале с разрывом сечения. Установлено, что для течения за обратным уступом при выходе из канала возможны три режима распространения детонации: докритический, критический и закритический. Изучены особенности распространения детонации в этих режимах. Выявлены характерные отличия, обусловленные процессами межфазного взаимодействия.

В [5] численно исследованы процессы горения и детонации аэровзвесей унитарного топлива в резко расширяющихся трубах. Рассмотрены процессы формирования волны детонации на участке составного трубопровода меньшего диаметра и последующей эволюции волны на участке трубопровода большего диаметра. Показано, что в зависимости от параметров аэровзвеси и широкой части трубопровода возможны режимы прерывания и продолжения детонации в широкой части при фиксированных диаметре частиц и размере узкой части трубопровода.

В настоящей работе, являющейся продолжением [5], исследуется влияние определяющих параметров двухфазной смеси и геометрии трубопровода на распространение детонационных волн в газовзвесах.

Система дифференциальных уравнений двумерного осесимметричного нестационарно-

го движения реагирующей смеси газа и частиц унитарного топлива и замыкающие соотношения аналогичны приведенным в [5, 6].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается простой трубопровод, составленный из труб диаметром  $D_1$  и  $D_2$  (рис. 1), заполненный однородной аэровзвесью унитарного топлива. Левый конец трубы ( $z = 0$ ) закрыт, правый ( $z = L$ ) открыт. В начальный момент времени у левого торца трубы в области 0 создается возмущение газа в виде треугольной ударной волны, которая воспламеняет аэровзвесь в зоне 1 узкой части трубопровода. При условии достаточности энергии инициирующей ударной волны требуется смоделировать взрыв аэровзвеси таким образом, чтобы в узкой части трубопровода сформировалась стационарная волна гетерогенной детонации, которая в последующем выходила бы в широкую часть 2 трубопровода. Требуется изучить влияние определяющих параметров трубопровода и газозвеси унитарного топлива на режимы распространения волны горения в зоне влияния местного сопротивления, обусловленного внезапным расширением двухфазного потока.

Начальные и граничные условия задачи аналогичны заданным в работе [5].

Задача решалась численно методом крупных частиц [7]. Расчеты выполнены для смесей воздуха и частиц пороха.

Все вычисления осуществлялись для длины инициирующей ударной волны  $z_f = 0.4$  м. В основной серии расчетов полагалось, что число Маха ударной волны  $M_0 = 9$ . Начальный диаметр ( $d_2$ ) частиц варьировался в интервале  $3 \leq d_2 \leq 60$  мкм, а массовое содержание частиц

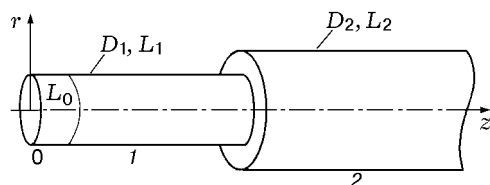


Рис. 1. Схема простого трубопровода:

$L_i, D_i$  — длина и внутренний диаметр  $i$ -го участка трубопровода ( $i = 1, 2$ ); 0 — область ударного инициирования в газе длиной  $L_0 = z_f$ , 1 и 2 — области трубопровода, заполненные аэровзвесью пороха, протяженностью  $L_1 = z_* - L_0$  и  $L_2 = z_{**} - (L_0 + L_1)$ ;  $z_*$  — осевая координата места внезапного расширения труб

( $m_2 = \rho_{20}/\rho_{10}$ ) — в интервале  $0.5 \leq m_2 \leq 2$ . Координаты  $z_f, z_*$  и  $z_{**}$  полагались равными 0.4, 25 и 50 м, а в отдельных расчетах — 0.4, 50 и 100 м. Радиус узкой части трубопровода изменялся в диапазоне  $0.04 \leq R_1 \leq 0.3$  м, а радиус его широкой части — в диапазоне  $0.08 \leq R_2 \leq 1.5$  м.

## НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Распространение детонационных волн в трубах с внезапным расширением представляет собой сложный нестационарный волновой процесс, который условно можно разделить на две стадии — одномерного и двумерного движений фаз. Основной целью этой работы является изучение распространения детонационных волн в широкой части трубопровода. На этот процесс влияют несколько факторов: геометрические параметры трубопровода, размер и относительное массовое содержание частиц, режим распространения детонационной волны и т. д. [3]. В настоящей работе подробно изучено влияние этих факторов.

При выходе детонационной волны из узкой части трубопровода в широкую часть возможны различные сценарии развития течения [4]: от частичного ослабления до полного срыва детонации, включая срыв с последующим реиницированием детонации. В экспериментах [8] установлено существование трех режимов детонации: в докритическом режиме происходит полный срыв детонации, в критическом — частичный срыв с последующим восстановлением, закритический режим характеризуется непрерывным распространением детонационного фронта.

На рис. 2 представлены некоторые результаты, соответствующие начальной стадии распространения детонационных волн в широкой части трубопровода. Диаметр частиц унитарного топлива составлял  $d_2 = 15$  мкм, начальное относительное массовое содержание частиц в смеси  $m_2 = 1$ . Радиус узкой части трубопровода равен  $R_1 = 0.1$  м, радиус его широкой части  $R_2 = 0.3$  м. Изобары давления на рис. 2, а соответствуют выходу волны горения в широкую часть трубопровода. Видно, что поток, выходящий из узкой части трубопровода, не сразу заполняет все поперечное сечение широкой части трубы, детонационный фронт деформируется и первоначально одномерный двухфазный поток трансформируется в двумерный осесимметричный. Перестройка потока обусловле-

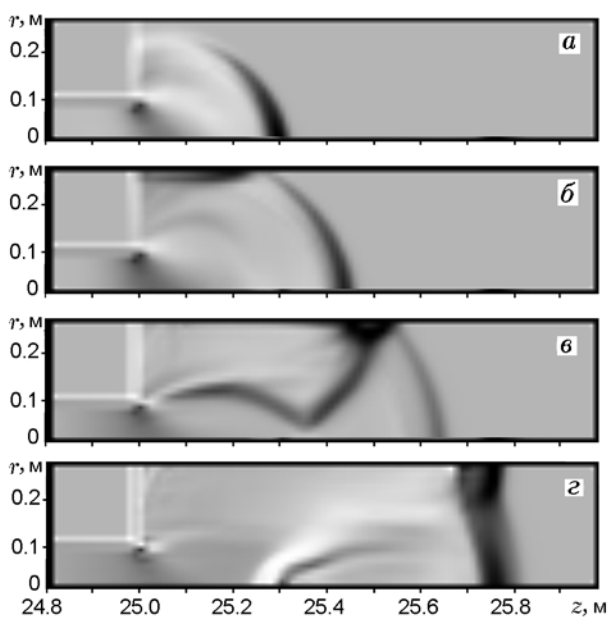


Рис. 2. Изобары  $p/p_0$  газа в широкой части трубопровода в моменты времени  $t = 19$  (а), 19.17 (б), 19.49 (в), 19.81 мс (г) ( $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.3$  м,  $m_2 = 1$ ,  $d_2 = 15$  мкм)

на действием волн разрежения, образующихся на стыке труб ( $r = R_1, z = z_*$ ) и распространяющихся по направлению к оси симметрии ( $r = 0$ ). В этих волнах разрежения поток ускоряется в радиальном направлении, а давление в смеси уменьшается.

На рис. 2,б показана начальная стадия двумерного волнового движения, соответствующая взаимодействию дифрагированной части детонационной волны с боковой поверхностью широкой части трубопровода. В процессе этого взаимодействия у боковой стенки широкой трубы формируется отраженная волна сжатия, причем отражение носит нерегулярный характер. Одновременно в окрестности контактной поверхности, которая отделяет газ, прошедший и ускоренный через волну разрежения, от газа, не прошедшего через волну разрежения и имеющего меньшую скорость, формируется вторичный ударный скачок. За этим скачком ускоренная газовая фаза тормозится с повышением в ней давления и температуры. Последующее взаимодействие волны разрежения с осью симметрии приводит к появлению волны разрежения, способствующей удлинению и искривлению вторичного ударного скачка до оси трубопровода. Понижение давления в отраженной волне разрежения обуславливает воз-

никновение в области под линией срыва потока волн сжатия, постепенно формирующих висячий ударный скачок уплотнения. Последний в дальнейшем взаимодействует с вторичным ударным скачком с образованием у оси трубопровода устойчивой тройной маховской конфигурации. Волна уплотнения, ранее сформировавшаяся у боковой поверхности трубы, взаимодействует с висячим скачком и диском Маха в центра потока. Последнее приводит к дополнительному повышению давления и интенсификации горения частиц в зоне взаимодействия волн (рис. 2,г). Отраженная от боковой поверхности и оси симметрии широкой части трубопровода волна сжатия стимулирует горение частиц пороха. Опуская для краткости дальнейшее рассмотрение сложных волновых процессов в трубе, отметим, что в конечном итоге в рассматриваемом примере процесс распространения горения в режиме детонации не прекращается.

На рис. 3 показаны поля плотностей взвеси диспергированного топлива, соответствующие процессу на рис. 2. Видно, что основная масса выгорающего топлива сосредоточена в сравнительно узкой зоне за фронтом пространственной дифрагирующей ударной волны. В области, прилегающей к боковой поверхности, и в зоне между вертикальной стенкой и боковой поверхностью трубы образуется слой выгораю-

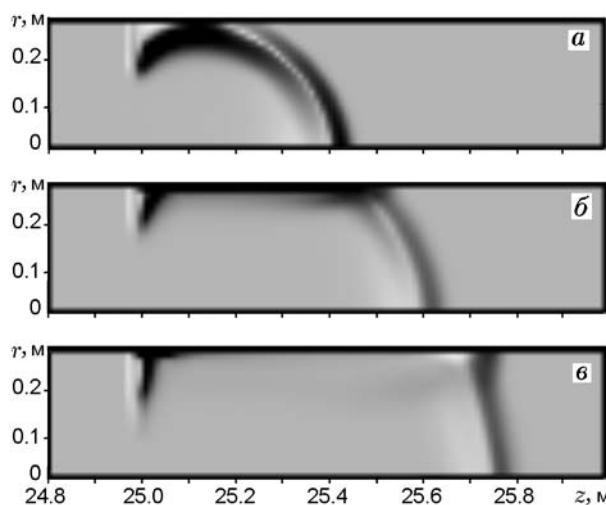


Рис. 3. Изолинии равной концентрации частиц  $\rho_2$  в широкой части трубопровода в моменты времени  $t = 19.17$  (а), 19.49 (б), 19.81 мс (в) ( $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.3$  м,  $m_2 = 1$ ,  $d_2 = 15$  мкм)

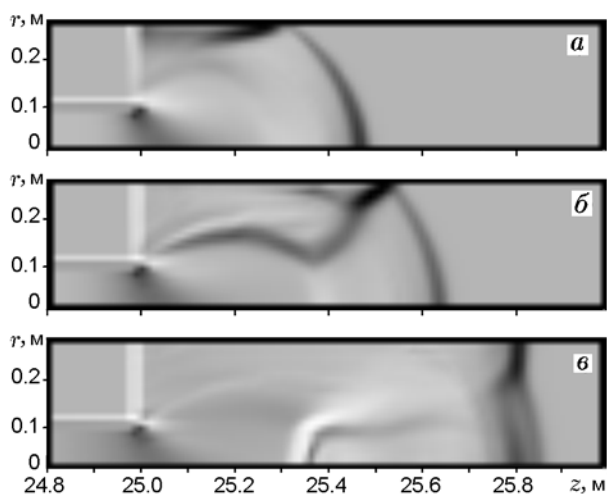


Рис. 4. Изобары  $p/p_0$  газа в широкой части трубопровода в моменты времени  $t = 20.2$  (а),  $20.45$  (б),  $20.83$  мс (в) ( $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.3$  м,  $m_2 = 1$ ,  $d_2 = 30$  мкм)

щего топлива, который со временем утончается.

Следует отметить, что описанный выше режим непрекращающейся гетерогенной детонации в трубопроводе не является единственным возможным. В ходе численного эксперимента установлено, что в зависимости от отношения  $D_2/D_1$  при прочих равных условиях возможен также режим затухающего горения газозвеси. На рис. 4 приведен пример докритического режима распространения детонации. В широкой части трубопровода наблюдается более сильное разрежение двухфазного потока. Кроме того, в этом случае увеличивается и время начала формирования отраженных волн сжатия, стимулирующих горение частиц. Перечисленные факторы способствуют формированию режима прерывания гетерогенной детонации в широкой части трубопровода.

Ниже приведены некоторые результаты численного исследования влияния геометрии широкой части трубопровода на распространение детонационных волн в газозвесьях унитарного топлива. На рис. 5 представлена огибающая максимальных давлений за волнами горения на оси симметрии в широких частях трубопровода радиусом  $R_2 = 0.2$  и  $0.5$  м ( $R_1 = 0.1$  м). Размер частиц равен  $d_2 = 15$  мкм, начальное относительное массовое содержание частиц  $m_2 = 2$ . В обоих случаях наблюдается продолжение детонационного процесса. С увеличением ширины трубы восстановление детонацион-

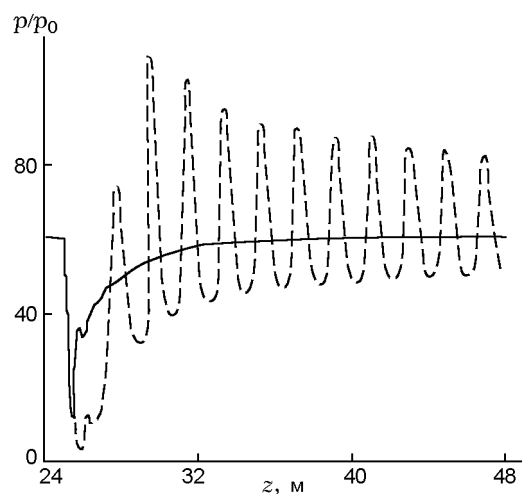


Рис. 5. Огибающие максимальных давлений за волнами горения частиц диаметром  $d_2 = 15$  мкм ( $m_2 = 2$ ) на оси симметрии в широкой части трубопровода:

сплошные линии —  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.2$  м, штриховые —  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.5$  м

ного процесса запаздывает.

На рис. 6 приведены огибающие максимальных давлений за волнами горения на оси симметрии в широкой части трубопровода при различных диаметрах узкой и широкой частей трубопровода и размере частиц 15 и 30 мкм. Начальное относительное массовое содержание  $m_2 = 1$ . Видно, что увеличение размеров узкой и широкой частей трубопровода приводит к качественному изменению распространения детонационных волн в его широкой части. При  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.25$  м (сплошные линии) колебательный характер наблюдается в области, прилегающей к началу широкой части, а при  $R_1 = 0.2$  м,  $R_2 = 0.5$  м (штриховые линии) — во всей широкой части трубопровода.

Обратимся к результатам численного исследования влияния размера частиц унитарного топлива на распространение детонационных волн в широкой части трубопровода. На рис. 7 приведены огибающие максимальных давлений за волнами горения на оси симметрии в широкой части трубопровода. Кривые 1–3 соответствуют частицам диаметром  $d_2 = 3, 15, 30$  мкм. Массовое содержание частиц равно  $m_2 = 1$ . Из рисунка видно, что размер частиц унитарного топлива качественно влияет на структуру детонационных волн. Уменьшение диаметра частиц приводит к сильным колебаниям давления. При фиксированных пара-

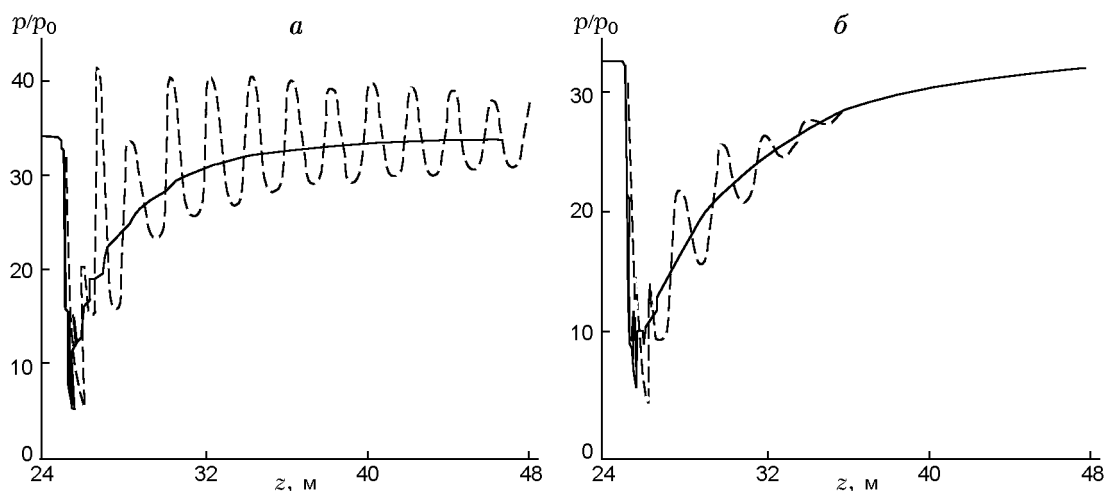


Рис. 6. Огибающие максимальных давлений за волнами горения частиц диаметром  $d_2 = 15$  (а), 30 мкм (б) ( $m_2 = 1$ ) на оси симметрии в широкой части трубопровода:

сплошные линии —  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.25$  м, штриховые —  $R_1 = 0.2$  м,  $R_2 = 0.5$  м

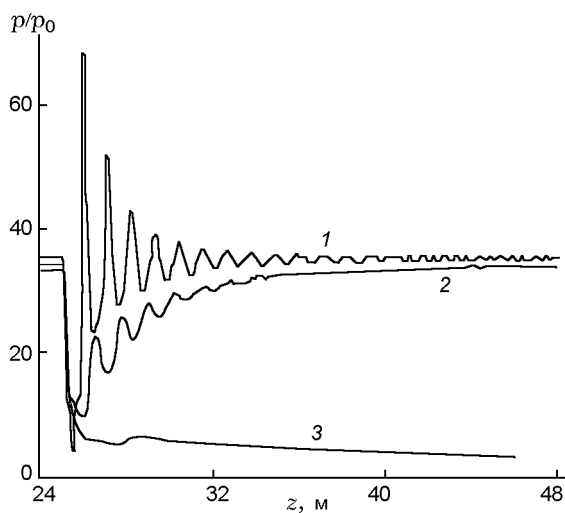


Рис. 7. Огибающие максимальных давлений за волнами горения частиц различного диаметра на оси симметрии в широкой части трубопровода:

$m_2 = 1$ ;  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.3$  м; 1 —  $d_2 = 3$  мкм, 2 —  $d_2 = 15$  мкм, 3 —  $d_2 = 30$  мкм

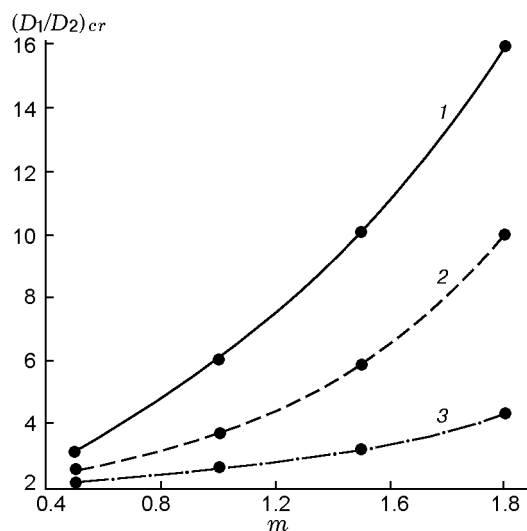


Рис. 8. Зависимость критического отношения диаметров труб составного трубопровода от относительного массового содержания частиц пороха:

точки — данные численного эксперимента, линии — аппроксимация: 1 —  $d_2 = 15$  мкм, 2 —  $d_2 = 30$  мкм, 3 —  $d_2 = 60$  мкм;  $D_1 = 0.1$  м

метрах трубопровода и газозвеси для частиц диаметром  $d_2 = 3$  и 15 мкм наблюдается продолжение детонации, для частиц диаметром  $d_2 = 30$  мкм — срыв детонации в широкой части трубопровода.

Для определения режима детонации в широкой части трубопровода численно исследовано влияние исходного относительного массового содержания взвеси унитарного топлива

( $m_2 = \rho_{20}/\rho_{10}$ ) на критическое значение отношения диаметров широкой и узкой частей трубопровода  $D_2/D_1$  при различных размерах частиц пороха. Соответствующие результаты приведены на рис. 8. Критическим считается такое значение  $D_2/D_1$ , выше которого реализуется режим прерывания детонации, а ниже — режим непрекращающейся детонации. Соглас-

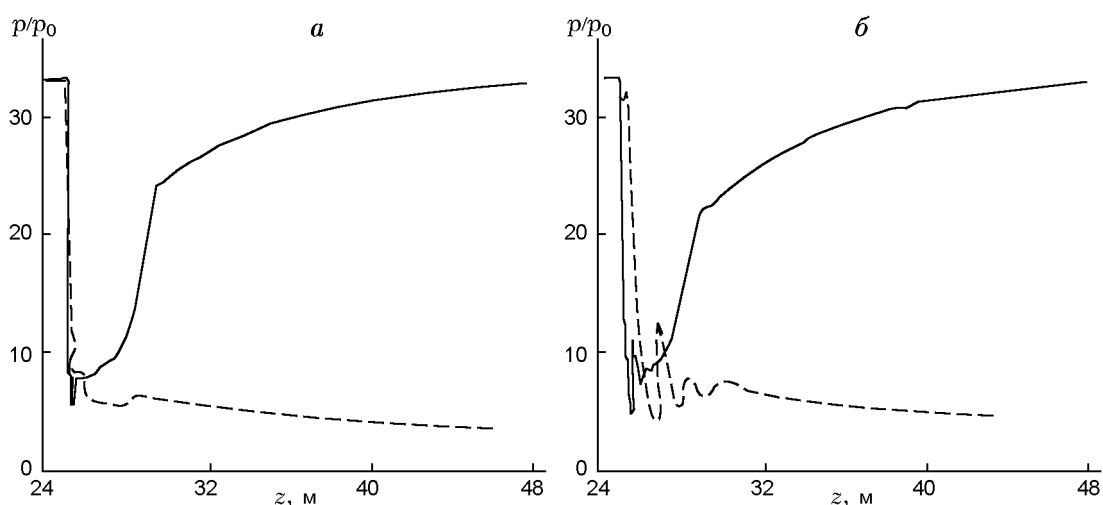


Рис. 9. Огибающие максимальных давлений за волнами горения частиц диаметром  $d_2 = 30$  мкм ( $m_2 = 1$ ) на оси симметрии в широкой части трубопровода:

*а*: сплошные линии —  $R_1 = 0.05$  м,  $R_2 = 0.15$  м, штриховые —  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.3$  м; *б*: сплошные линии —  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.28$  м, штриховые —  $R_1 = 0.28$  м,  $R_2 = 0.84$  м

но рис. 8 критическое значение  $D_2/D_1$  монотонно увеличивается с ростом относительного массового содержания взвеси.

Наибольший интерес вызывает изучение влияния изменения размера узкой части трубопровода на распространение детонационных волн. На рис. 9 представлена огибающая мак-

симальных давлений за волнами горения на оси симметрии широкой части трубопровода. Сплошные линии соответствуют  $R_1 = 0.05$  м,  $R_2 = 0.15$  м (*а*),  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.28$  м (*б*), штриховые —  $R_1 = 0.1$  м,  $R_2 = 0.3$  м (*а*),  $R_1 = 0.28$  м,  $R_2 = 0.84$  м (*б*). Во всех случаях  $D_2/D_1 = 3$ . Из рисунков видно, что увеличение диаметров узкой и широкой частей приводит к быстрому затуханию детонационных волн в широкой части трубопровода.

На рис. 10 приведены интегральные результаты, характеризующие влияние размера узкой части трубопровода и исходного относительного массового содержания взвеси унитарного топлива ( $m_2 = \rho_{20}/\rho_{10}$ ) на критическое отношение  $D_1/D_2$  при различных размерах частиц пороха на режимы детонации в широкой части. Согласно рис. 10 критическое значение отношения  $D_1/D_2$  монотонно уменьшается с ростом относительного массового содержания взвеси.

## ВЫВОДЫ

— Увеличение отношения диаметров  $D_2/D_1$  трубопровода приводит к осцилляции давления вблизи границы разделения узкой и широкой частей за счет многократного отражения ударной волны от оси симметрии и боковой поверхности широкой части.

— Проведенное исследование свидетельствует о возможности прерывания или про-

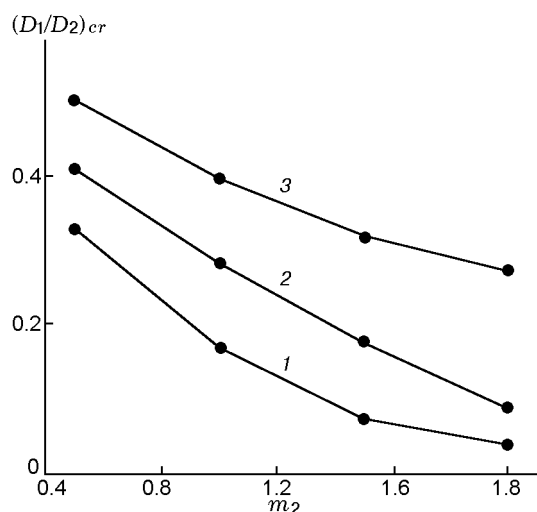


Рис. 10. Зависимость критического отношения диаметров труб составного трубопровода от относительного массового содержания частиц пороха:

точки — данные численного эксперимента, линия 1 —  $d_2 = 15$  мкм, 2 —  $d_2 = 30$  мкм, 3 —  $d_2 = 60$  мкм;  $D_2 = 1$  м

должения процесса распространения волны гетерогенной детонации в трубопроводе посредством внезапного расширения потока в широкой части трубы.

— Получены интегральные зависимости критического значения отношения различных диаметров широкой и узкой частей трубопровода от относительного массового содержания частиц унитарного топлива разного размера.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Хмель Т. А., Федоров А. В. Численные технологии исследования гетерогенной детонации газовзвесей // Мат. моделирование. — 2006. — Т. 18, № 6. — С. 49–63.
2. Кутушев А. Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. — СПб.: Недра, 2003.
3. Федоров А. В., Кратова Ю. В., Хмель Т. А., Фомин В. М. Распространение ударных и детонационных волн в каналах различной геометрии в газовзвесах // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. — 2008. — Т. 7. — <http://www.chemphys.edu.ru/media/files/2008-09-01-006.pdf>. (Электронный журнал, номер гос. регистрации 0420700013. ISSN 1991-6396).
4. Кратова Ю. В., Федоров А. В., Хмель Т. А. Распространения детонационных волн в газовзвесах в каналах с внезапным расширением // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 1. — С. 80–91.
5. Кутушев А. Г., Шорохова Л. В. Численное исследование процессов горения и детонации аэровзвесей унитарного топлива в резко расширяющихся трубах // Хим. физика. — 2003. — Т. 22, № 8. — С. 94–99.
6. Кутушев А. Г., Татосов А. В. Нестационарное волновое истечение в атмосферу горячей аэровзвеси твердого унитарного топлива из открытой с торца цилиндрической трубы // Горение твердого топлива: сб. докл. VI Всерос. конф. — Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2006. — С. 178–186.
7. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике. — М.: Наука, 1982.
8. Зельдович Я. Б., Когарко С. М., Симонов Н. Н. Экспериментальное исследование сферической газовой детонации // Журн. техн. физики. — 1956. — Т. 26, вып. 8. — С. 1689–1713.

*Поступила в редакцию 24/IX 2010 г.,  
в окончательном варианте — 28/XII 2012 г.*