

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В МОНОДИСПЕРСНЫХ ГАЗОВЗВЕСЯХ С НЕОДНОРОДНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ В РЕЗКО РАСШИРЯЮЩИХСЯ ТРУБАХ

У. А. Назаров

доктор физико-математических наук, доцент, Самаркандский государственный
архитектурно-строительный университет

umaralin@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

В рамках модели двухмерного осисимметричного нестационарного движения реагирующей смеси газа и частиц унитарного топлива выполнено математическое моделирование механизмов распространения волн горения и гетерогенной детонации в резко расширяющихся трубах. Изучено влияния неоднородности распределение концентрации частиц унитарного топлива на распространение детонационных волн в газовзвесах унитарного топлива.

Ключевые слова: трубопровод, горение, детонация, детонационная волна, численное исследование, унитарного топлива, массовое содержание частиц, неоднородность.

ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2, 3, 4] численно исследованы процессы дифракции плоской детонационной волны в газовзвеси в плоском канале с разрывом сечения. Изучено влияние геометрических параметров канала и размера частиц на распространение детонации в широкой части канала. Установлено, что для течения с обратным уступом при выходе из канала возможны три режима распространения детонации: докритический, критический и закритический. В работе на конкретных примерах показано, что возникновение этих режимов зависит от различных значений канала и частицы.

В работах [5, 6] рассматривается выход детонационных волн из плоского канала в область с линейным расширением поперечного сечения канала. Анализируется процесс перехода волны детонации в расширяющийся участок и дальнейшее распространение. Приведены численные результаты течения при различных углах расширения. Установлено три режима распространения детонации: закритический, критический и докритический, найденные ранее в работе [1, 2, 3, 4].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Результаты численного исследования закономерностей распространения детонационных волн в моно- и полидисперсных (двухфракционных) газовзвесьях унитарного топлива в резко расширяющихся трубах приведены в [7, 8]. Проведены численные расчеты с различными размерами и относительными массовыми содержаниями частиц обеих фракций. Осуществляется сравнительный анализ влияния моно- и полидисперсности частиц унитарного топлива на ослабление детонационных волн. Приведены зависимости критического отношения диаметров труб составного трубопровода от относительного массового содержания и моно- и полидисперсности частиц разного размера.

В настоящей работе, являющейся логическим продолжением [7, 8], приводятся результаты влияния пространственно неоднородного распределения концентрации частиц унитарного топлива на распространения детонационных волн в газовзвесьях в широкой части трубопровода. Установлено, что при фиксированной общей массе взвеси лучше ослабляют детонационные волны слой с линейно-убывающим законом изменения концентрации частиц, чем с линейно-возрастающим.

Система дифференциальных уравнений двухмерного осесимметричного нестационарного движения реагирующей смеси газа и частиц унитарного топлива и замыкающие соотношения, аналогична [7, 9, 10].

Рассматривается простой трубопровод, составленный из труб разного диаметра, D_1 и D_2 (см. рис. 1), заполненный однородной аэровзвесью унитарного топлива. Левый конец трубы ($z=0$) закрыт, а правый ($z=L$) открыт. В начальный момент времени у левого торца трубы в области 0 создается возмущение газа в виде треугольной ударной волны, воспламеняющее 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 должна выйти в широкую часть 2 трубопровода. Распределение начальной концентрации частиц в широкой части трубопровода в продольном сечении подчиняется линейно возрастающему или линейно убывающему закону $\rho_2(z,0) = Az - B$, $A, B = const$.

Требуется изучить влияния законы распределения начальной концентрации частиц унитарного топлива на

распространение волны гетерогенной детонации в широкой части трубопровода.

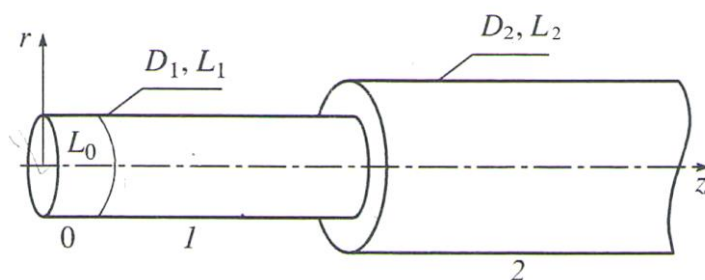


Рис. 1. Схема простого трубопровода: L_i, D_i – длина и внутренний диаметр i -го участка трубопровода ($i = 1; 2$); 0 – область ударного инициирования в газе длиной $L_0 = z_f$, 1 и 2 – области трубопровода, заполненные аэровзвесью пороха, с протяженностями $L_1 = z_* - L_0$ и $L_2 = z_{**} - (L_0 +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

Начальные и граничные условия задачи задаются аналогично в работе [9].

Задача решалась численно методом крупных частиц [11]. Расчеты выполнялись 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 $3 \leq d_2 \leq 30$ мкм, а массовое содержание частиц ($m_2 = \rho_{20} / \rho_{10}$) варьировалось в интервале $0.5 \leq m_2 \leq 2$. Координаты z_f, z_* и z_{**} полагались равными 0.4, 20 и 50 м. В расчетах радиус узкой части трубопровода (R_1) варьировался в интервале $0.04 \leq R_1 \leq 0.1$ м., а радиус его широкой части (R_2) варьировался в интервале $0.1 \leq R_2 \leq 0.3$ м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже приводятся характерные примеры численного исследования процесса распространения волны гетерогенной детонации в газовой смеси, а также последующего прохождения детонационной волны через слой неоднородных частиц унитарного топлива. На рис. 2 представлены расчетные профили давления (а) и массовой скорости (б) газовой смеси при формировании волны гетерогенной детонации в узкой и широкой части трубопровода распространяющимися по первоначально покоящимся однородным газозвесьям (в узкой части), а потом неоднородным, т.е. с линейно возрастающим изменением

концентрации частиц унитарного топлива (в широкой части) на оси симметрии на моменты времени $t = 4.7; 9.4; 14.1; 18.8; 23.6; 28.3; 33.04; 40.08$ мс. Число Маха инициирующей ударной волны $M_0 = 9$, диаметр частиц унитарного топлива составлял $d_{20} = 15$ мкм, начальное относительное массовое содержание частиц в смеси в узкой части трубопровода $m_{20} = 1$, в широкой части трубопровода определяются по формуле $\rho_2(z,0) = Az - B$, соответствующей линейно возрастающему изменению концентрации частиц унитарного топлива, где $A = 0.08; B = 2; 25 < z \leq 50$. Радиус узкой части трубопровода равен $R_1 = 0.1$ м, а радиус его широкой части $R_2 = 0.3$ м.

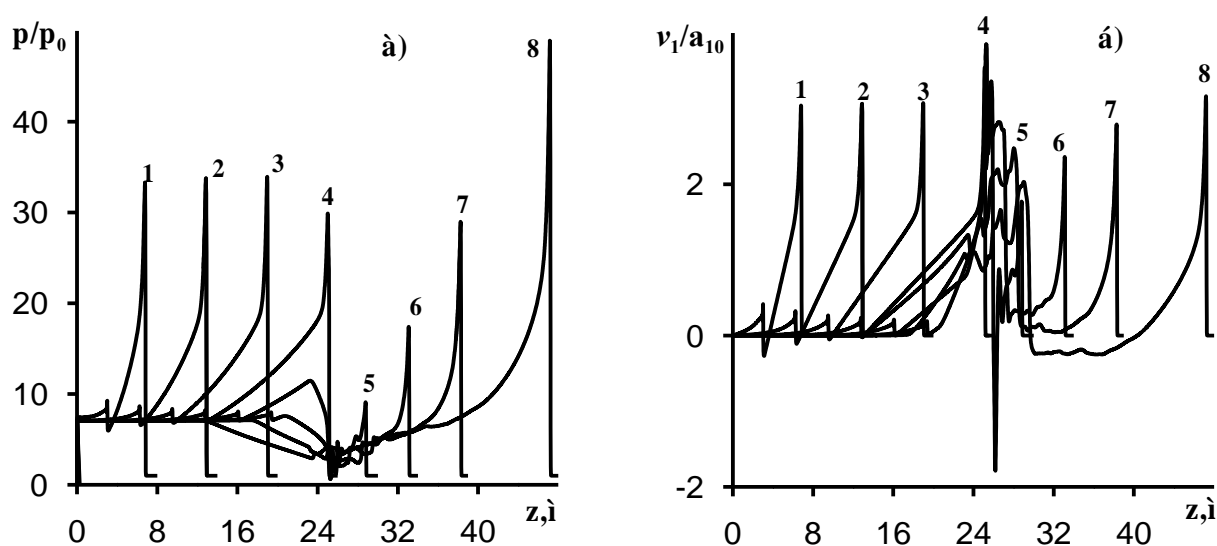


Рис. 2. Профили давления (а) и массовой скорости (б) газовой смеси на этапе формирования волны гетерогенной детонации в трубопроводе через слой с линейно возрастающей концентрацией частиц унитарного топлива на оси симметрии в различные моменты времени: $t = 4.7; 9.4; 14.1; 18.8; 23.6; 28.3; 33.04; 40.08$ мс (0-8). Начальный диаметр частиц $d_{20} = 15$ мкм. $R_1 = 0.1$ м, $R_2 = 0.3$ м.

Представленные численные решения свидетельствуют, что при распространении детонационных волн по покоящейся неоднородной газовой смеси с возрастающим вдоль траектории волны массовым содержанием частиц, происходит усиление детонационных волн (повышение давления в волне). Массовая скорость газа и скорость самой детонационных волн уменьшаются в процессе проникания волны в область все более плотной газовой смеси. Раньше приходят в движение легкие части газовой смеси, позже – более тяжелые слои газовой смеси. Легкие слои газовой смеси, проникая в область тяжелых слоев газовой смеси вызывают увеличение средней плотности частиц на границе облака и внутри его

возмущенной части. Ввиду того, что скорость детонационных волн больше массовой скорости фаз, область пришедших в движение все более тяжелых слоев частиц взвеси со временем возрастает. В результате за проходящей детонационных волн в газозвеси образуется «вал» средней плотности частиц, который по мере движения волны укучается (см. рис. 3). Вершина «вала» средней плотности частиц располагается ниже по течению от границы облака.

Интересно заметить, что при распространении детонационных волн по газозвеси с из-за торможения газового потока и инерции частиц реализуется зона течения за фронтом детонационных волн, где скорость частиц меньше скорости газа ($v_{2z} < v_{1z}$) и зона течения вдали от фронта детонационных волн, где скорость частиц больше скорости газа ($v_{2z} > v_{1z}$).

На рис. 3 приведены соответствующие рис. 2 характерные профили средней плотности частиц унитарного топлива на оси симметрии в моменты времени $t = 4.7; 9.4; 14.1; 18.8; 23.6; 28.3; 33.04; 40.08$ мс. Взаимодействие лидирующей ударной волны с частицами приводит к формированию слоев повышенной плотности на передней кромке облака и внутри его возмущенной части.

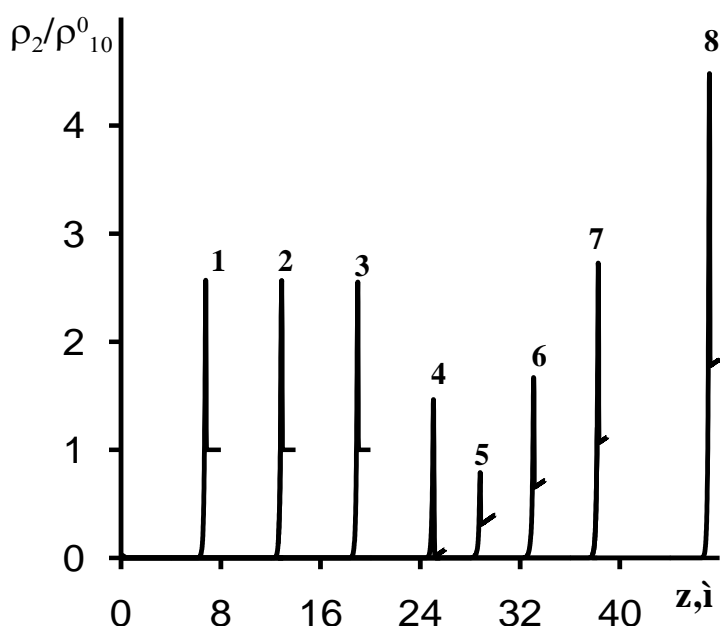


Рис. 3. Профили средней плотности частиц унитарного топлива на оси симметрии в моменты времени $t = 4,7; 9,4; 14,1; 18,8; 23,6; 28,3; 33,04; 40,08$ мс (0–8).

На рис. 4 представлены расчетные профили давления (а) и массовой скорости (б) газовой смеси при формировании волны гетерогенной детонации в узкой и широкой части трубопровода, распространяющимися по первоначально

покоящимся однородным газозвесьям (в узкой части), а потом неоднородным, т.е. с линейно убывающим изменением концентрации частиц унитарного топлива (в широкой части) на оси симметрии на моменты времени $t = 4.7; 9.4; 14.1; 18.8; 23.6; 28.3; 33.04; 37.7$ мс. Число Маха инициирующей ударной волны $M_0 = 9$, диаметр частиц унитарного топлива составлял $d_{20} = 15$ мкм, начальное относительное массовое содержание частиц в смеси в узкой части трубопровода $m_{20} = 1$, в широкой части трубопровода определяются по формуле $\rho_2(z,0) = Az + B$ соответствующей линейно убывающему изменению концентрации частиц унитарного топлива, где $A = -0.08; B = 4; 25 < z \leq 50$. Радиус узкой части трубопровода равен $R_1 = 0.1$ м, а радиус его широкой части $R_2 = 0.3$ м.

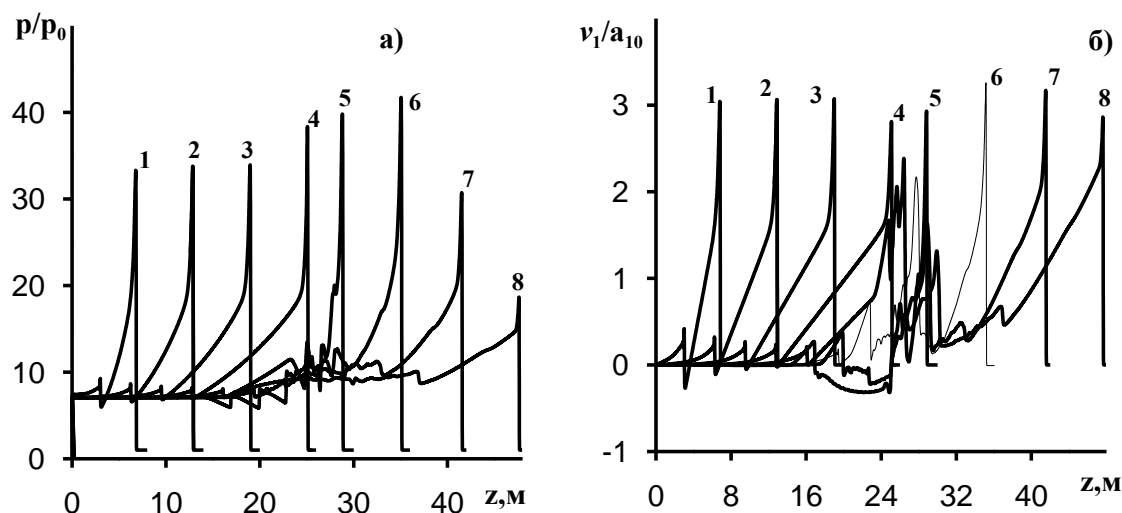


Рис. 4. Профили давления (а) и массовой скорости (б) газовой смеси на этапе формирования волны гетерогенной детонации в трубопровода через слой с линейно убывающей концентрацией частиц унитарного топлива на оси симметрии в различные моменты времени: $t = 4.7; 9.4; 14.1; 18.8; 23.6; 28.3; 33.04; 37.7$ мс (0-8). Начальный диаметр частиц $d_{20} = 15$ мкм. $R_1 = 0.1$ м, $R_2 = 0,3$ м.

При распространении детонационных волн по неоднородной газозвеси с линейно-уменьшающимся массовым содержанием взвешенных частиц первоначально наблюдается усиление детонационных волн (по давлению), а в последующем – разгон детонационных волн с постепенным понижением давления. Повышение давления в первые моменты времени взаимодействия детонационных волн с запыленным пространством обусловлено резким торможением потока плотными слоями взвеси частиц. Последующие ускоренное движение

проходящей детонационной волны в газозвеси связано с ослабляющим тормозящим воздействием взвешенных частиц на динамику газа из-за уменьшения массового содержания частиц вдоль траектории детонационной волны. При распространении детонационных волн по газозвеси поток газа вовлекает в движение сначала частицы из более плотных слоев газозвеси, затем – частицы из менее плотных слоев газозвеси. Ускоренные частицы из плотных слоев газозвеси проникают в слои менее плотной газозвеси и в связи с этим происходит уплотнение облака с пиком средней плотности частиц на границе облака. С течением времени область возмущенной газозвеси увеличивается, в движение включаются все более легкие слои и потому уплотнение облака сменяется постепенным, уменьшением средней плотности частиц.

На рис. 5 приведены соответствующие рис. 4 характерные профили средней плотности частиц унитарного топлива на оси симметрии в моменты времени $t = 4.7; 9.4; 14.1; 18.8; 23.6; 28.3; 33.04; 40.08$ мс. При распространении детонационных волн по газозвеси с линейно убывающим массовым содержанием частиц унитарного топлива аналогично случаю возрастающей концентрации формируется слой повышенной плотности на передней границе облака. Далее в движение включаются слои меньшей плотности, поэтому имеет место постепенное уменьшение средней плотности частиц (см. рис. 5 кривые 5–8).

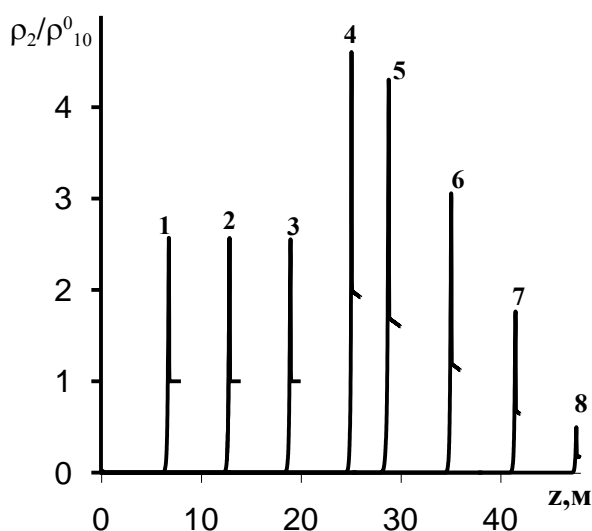


Рис. 5. Профили средней плотности частиц унитарного топлива на оси симметрии в моменты времени $t = 4,7; 9,4; 14,1; 18,8; 23,6; 28,3; 33,04; 40,08$ мс (0–8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты выполненного численного исследования свидетельствуют о возможности полного

прекращения или продолжения детонации в трубопроводе при прохождении через слой неоднородных частиц унитарного топлива. Показано, что при фиксированной общей массе взвеси лучше ослабляют детонационные волны слой с линейно-убывающим законом изменения концентрации частиц, чем с линейно-возрастающим.

REFERENCES

1. Arienti M., Shepherd J.E. A numerical study of detonation diffraction // *Journal of Fluid Mechanics* – 2005. – V. 529. – P.117–146.
2. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Дифракция плоской детонационной волны на обратном уступе в газовзвеси // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45, – № 5. – С. 95–107.
3. Кратова Ю.В., Федоров А.В., Хмель Т.А. Распространение детонационных волн в газовзвесах в каналах с внезапным расширением // *Физика горения и взрыва*. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 80–91.
4. Pantov E.G., Fischer M., Kratzel Th. Decoupling and recoupling of detonation waves associated with sudden expansion // *Shock Waves*. – 1996. – V. 6 – P. 131–137.
5. Fedorov A. V., Khmel T. A., Lavruk S. A. [Exit of a heterogeneous detonation wave into a channel with linear expansion. I. Propagation regimes](#) // [Combustion, Explosion, and Shock Waves](#). 2017. – Vol. 53. – № 5. pp: 585 – 595.
6. Fedorov A. V., Khmel T. A., Lavruk S. A. [Exit of a Heterogeneous Detonation Wave into a Channel with Linear Expansion. II. Critical Propagation Condition](#) // [Combustion, Explosion, and Shock Waves](#). 2018. – Vol. 54. – № 1. pp: 72 – 81.
7. Burnashev V.F., Nazarov U.A., and Khuzhaerov B.Kh. Detonation Waves in Polydisperse Gas Suspensions of Monofuel in Tubes with an Abrupt Expansion. *Journal of Fluid Dynamics*. 2016. V.51. № 4. P. 507–512.
8. Kutushev A.G., Burnashev B.F., Nazarov U.A. Numerical Study of Detonation Waves in a Monofuel-Gas Mixture in Sharply Expanding Pipes. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2013. Vol. 49. № 4. pp. 418– 423.
9. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. – СПб.: Недра. – 2003. –284 с.
10. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч.1. – 464 с.
11. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.

