

УДК 532.529: 518.5

ПРЕРЫВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЗВЕСЯХ СЛОЕМ ОДНОРОДНЫХ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

Назаров У.А.

доктор физико-математических наук, доцент, Самаркандский государственный
университет

тел.: +(99899) 104-48-62, e-mail: umaralin@rambler.ru

Назаров О.У.

преподаватель Самаркандский институт экономики и сервиса

тел.: +(99899) 054-72-48, e-mail: nazarovotabek17@mail.ru

<https://doi.org/10.5281/zenodo.12171046>

Аннотация. В рамках модели нестационарного движения многофазной многокомпонентной смеси приводится численного моделирования двухмерного осесимметричного нестационарного движения дисперсной трёхфазной реагирующей смеси двух компонентного газа, частиц унитарного топлива и однородных инертных частиц. Изучено прерывание распространения волн гетерогенной детонации в монодисперсных газовзвесах унитарного топлива слоями однородной монодисперсной инертной взвеси. Исследовано влияние относительного массового содержания химически-инертных частиц, их диаметр и длины слоя на прерывание распространения волны гетерогенной детонации в газовзвесах унитарного топлива.

Ключевые слова: трубопровод, горение, детонация, ударная волна, детонационная волна, прерывание, унитарного топлива, инертных частиц, массовое содержание частиц.

INTERRUPTION OF PROPAGATION OF DETONATION WAVES IN GAS SUSPENSIONS BY A LAYER OF HOMOGENEOUS INERT PARTICLES

Abstract. Within the framework of the model of unsteady motion of a multiphase multicomponent mixture, a numerical simulation of two-dimensional axisymmetric unsteady motion of a dispersed three-phase reacting mixture of two component gas, unitary fuel particles and homogeneous inert particles is presented. The interruption of the propagation of heterogeneous detonation waves in monodisperse gas suspensions of unitary fuel by layers of homogeneous monodisperse inert suspension has been studied. The influence of the relative mass content of chemically inert particles, their diameter and layer length on interrupting the propagation of a heterogeneous detonation wave in gas suspensions of unitary fuel has been studied.

Key words: pipeline, combustion, detonation, shock wave, detonation wave, interruption, unitary fuel, inert particles, mass content of particles.

ВВЕДЕНИЕ

В современной техники и технологии [1] используются пневмотранспортные системы, с помощью которых осуществляется перенос по трубопроводам, под действием сжатого газа, горючих мелкодиспергированных материалов. Пневмотранспортные системы применяются в технологии производства разнообразных взрывчатых веществ в процессе их сушки. К числу таких взрывчатых веществ относятся унитарные топлива. Практика

эксплуатации пневмотранспортных систем с диспергированным унитарным топливом свидетельствует о сравнительно крайне нежелательных случаях возгорания дисперсных частиц в двухфазном потоке и последующего перехода горения в гетерогенную детонацию, т.е. взрыв. Одно из технических решений системы взрывной защиты предполагает импульсный ввод в транспортную магистраль огнетушащего порошка на пути распространения волны горения с целью её ослабления и последующего полного затухания.

Достоинством такой системы взрывной защиты, именуемой также прерывателем детонации, является объёмный пламягасящий эффект слоя частиц распыленного порошка и весьма кратковременный период подавления волн горения и детонации.

В работах [2, 3] на основе уравнений одномерного плоского нестационарного движения трехскоростной трехтемпературной с одним давлением смеси газа с дисперсными включениями реагирующей и инертной фаз числена, решена задача о подавлении волны гетерогенной детонации в облаке газозвеси унитарного топлива, содержащем внутри себя слой инертных частиц. Установлено, что в зависимости от параметров унитарного топлива и взвеси инертных частиц возможны как режимы прерывания, так и непрерывания распространения волн детонации. Исследовано влияния пространственной неоднородности распределения химически инертных частиц в экранирующем слое на процесс подавления волны гетерогенной детонации.

В [4] приведены результаты численного исследования прерывание распространения детонационных волн в газозвесах унитарного топлива слоем неоднородных инертных частиц. Показано, что диаметр, длины слоя и неоднородность инертных частиц влияет на процесс прерывания волны гетерогенной детонации в газозвесах унитарного топлива. Установлено, что при фиксированной общей массе взвеси, лучше ослабляют детонационные волны слой с линейно-убывающим законом изменения концентрации инертных частиц, чем с линейно-возрастающим и однородным.

В настоящей работе численно исследуется процесс распространения детонационных волн в газозвесах унитарного топлива, содержащей слой однородной инертных частиц.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка задачи. В начальный момент времени $t = 0$ из области инертного газа ($0 \leq z \leq z_f$) (см. рис. 1) в направлении облака унитарного топлива ($z_f < z < \infty$), содержащего внутри себя слой химически – инертных частиц ($z_L \leq z \leq z_R, z_L > z_f$) движется ударная волна с треугольным профилем. После взаимодействия набегающей ударной волны с облаком монодисперсной газозвеси частицы унитарного топлива, в проходящей ударной волне, воспламеняются, и возникает волна горения, переходящая в волну гетерогенной детонации, распространяющейся в режиме Чепмена – Жуге (при условии, что параметры ударной волны и горючей двухфазной среды допускают возникновение детонации и преддетонационные расстояния L_{C-J} меньше величины $z_L - z_f$). Волна гетерогенной детонации взаимодействует со слоем трёхфазной смеси газа, частиц унитарного топлива и инертных частиц ($z_L \leq z \leq z_R$) и благодаря диссипации своей

энергии на взвешенных монодисперсных включениях дисперсной фазы трансформируется в ударную волну, за фронтом которой осуществляется или прекращается процесс горения.

В последующем, ударная волна распространяется по невозмущенной двухфазной смеси газа и частиц унитарного топлива в области $z > z_R$. При этом, в зависимости от параметров слоя инертных частиц ударная волна, в области $z_R < z < \infty$ может, распространяется как в режиме усиления, так и в режиме затухания. Требуется изучить закономерностей прерывания распространение детонационных волн в газозвесьях унитарного топлива слоем инертных частиц.

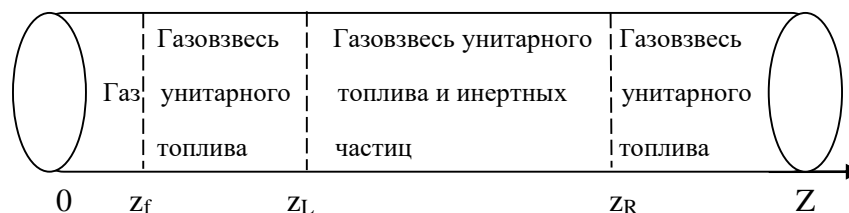


Рис. 1. Схематическое представление задачи о прерывании распространения волны гетерогенной детонации слоем инертных частиц

Система дифференциальных уравнений двухмерного осесимметричного нестационарного движения дисперсной трёхфазной реагирующей смеси газа, частиц унитарного топлива и инертных частиц, можно записать в следующем виде [1, 4, 6]:

уравнения сохранения масс газовой смеси, частиц унитарного топлива и инертных частиц

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_1 v_{1r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_{1z})}{\partial z} = J,$$

$$\frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_2 v_{2r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 v_{2z})}{\partial z} = -J,$$

(1)

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_3 v_{3r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_3 v_{3z})}{\partial z} = 0,$$

уравнения сохранения масс инертного газа и газообразных продуктов горения газовой смеси

$$\frac{\partial \rho_{11}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{11} v_{1r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{11} v_{1z})}{\partial z} = 0,$$

(2)

$$\frac{\partial \rho_{12}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_{12} v_{1r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_{12} v_{1z})}{\partial z} = J,$$

$$\rho_{11} = \rho_{11}^0 \alpha_{11}, \quad \rho_{12} = \rho_{12}^0 \alpha_{11}, \quad \rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \quad \rho_1 = \rho_{11} + \rho_{12}, \quad \rho_2 = \rho_2^0 \alpha_2, \quad \rho_3 = \rho_3^0 \alpha_3,$$

$$\alpha_1 = \alpha_{11} = \alpha_{12}, \quad \rho_1^0 = \rho_{11}^0 + \rho_{12}^0,$$

уравнения сохранения числа дисперсных частиц

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(n_2 v_{2r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(n_2 v_{2z})}{\partial z} = 0,$$

(3)

$$\frac{\partial n_3}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(n_3 v_{3r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(n_3 v_{3z})}{\partial z} = 0,$$

уравнения сохранения импульса фаз

$$\frac{\partial(\rho_1 v_{1r})}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_1 v_{1r} v_{1r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_{1r} v_{1z})}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial r} = -F_{2r} - F_{3r} + Jv_{2r},$$

$$\frac{\partial(\rho_1 v_{1z})}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_1 v_{1r} v_{1z} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_1 v_{1z} v_{1z})}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = -F_{2z} - F_{3z} + Jv_{2z},$$

$$\frac{\partial \rho_2 v_{2r}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_2 v_{2r} v_{2r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 v_{2r} v_{2z})}{\partial z} = F_{2r} - Jv_{2r},$$

(4)

$$\frac{\partial \rho_2 v_{2z}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_2 v_{2r} v_{2z} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 v_{2z} v_{2z})}{\partial z} = F_{2z} - Jv_{2z},$$

$$\frac{\partial \rho_3 v_{3r}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_3 v_{3r} v_{3r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_3 v_{3r} v_{3z})}{\partial z} = F_{3r},$$

$$\frac{\partial \rho_3 v_{3z}}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_3 v_{3r} v_{3z} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_3 v_{3z} v_{3z})}{\partial z} = F_{3z},$$

уравнения притоков тепла к фазам частиц

$$\frac{\partial(\rho_2 e_2)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_2 e_2 v_{2r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_2 e_2 v_{2z})}{\partial z} = Q_{12} \eta(-J) - J e_2,$$

(5)

$$\frac{\partial(\rho_3 e_3)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_3 e_3 v_{3r} r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_3 e_3 v_{3z})}{\partial z} = Q_{13},$$

уравнения сохранения полной энергии смеси

$$\sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial(\rho_i E_i)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i E_i + \alpha_i p) v_{ir} r}{\partial r} + \frac{\partial(\rho_i E_i + \alpha_i p) v_{iz}}{\partial z} \right] = 0,$$

(6)

$$v_i^2 = v_{ir}^2 + v_{iz}^2, \alpha_j = \frac{1}{6} \pi d_j^3 n_j, \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, E_i = e_i + 0.5 v_i^2, (i = 1; 2; 3).$$

Здесь представлены уравнения сохранения масс газовой смеси, частиц унитарного топлива и инертных частиц; уравнение сохранения инертного газа и газообразных продуктов горения; уравнение сохранения числа горючих и инертных частиц; уравнение сохранения импульсов фаз в проекциях на оси декартовой системы координат r и z ; уравнений притоков тепла к частицам горючей и инертной дисперсных фаз; уравнения сохранения полной энергии трехфазной смеси в целом.

Индексы «1», «2» и «3» внизу относятся к параметрам газовой и двух дисперсных фаз;

В уравнениях (1) – (6) ρ_{11}, ρ_{12} и ρ_{11}^0, ρ_{12}^0 – приведенная и истинная плотности компоненты газовой фазы; $\rho_i, \rho_i^0, v_i, \alpha_i, e_i, E_i$ – соответственно средняя и истинная плотности, массовая скорость, объемное содержание, удельные внутренняя и полная энергии i -й фазы; v_{ir} и v_{iz} – компоненты скорости v_i ; n_2 – число частиц унитарного топлива в единице объема смеси; n_3 – число инертных частиц в единице объема смеси; d_2 – диаметр частиц унитарного топлива и d_3 – диаметр инертных частиц; p – давление газовой смеси; F_{jr} и F_{jz} – составляющие силы межфазного трения; Q_{1j} – интенсивность теплообмена между газовой и дисперсными фазами; J – интенсивность межфазного массообмена; η – единичная функция Хевисайда.

Замыкающие соотношения, начальные и граничные условия задачи задаются аналогично [1, 4].

Задача решалась численно методом крупных частиц [5, 7]. Расчеты выполнялись для смесей воздуха, газообразных продуктов горения пороха, частиц унитарного топлива и кварцевого песка.

Во всех расчетах начальная длина инициирующей ударной волны полагались равными $z_f = 0.4$ м, радиус трубопровода $r = 0.1$ м и характерные значения преддетонационного расстояния составляет величину 30 м, т.е. $z_l = 30$ м. Число Маха (M) набегающей ударной волны равно 9, что соответствует давлению за ударным скачком 9.43 МПа. Длины слоя инертных частиц l_s варьировался в интервале $5 \leq l_s \leq 10$ м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 представлена результаты влияние начального относительного массового содержания унитарного топлива m_{20} ($d_{20} = 30$ мкм) на минимального относительного массового содержания твердых частиц m_{30} необходимого для гашения детонации. Кривая

1 соответствует твердым частицам с диаметром $d_{30} = 30$ мкм, 2 – $d_{30} = 180$ мкм. Протяжённости экранирующих слоёв инертной газозвеси $l_s = 5$ м. Видно, что размер твердых частиц существенно влияет на прерывание распространения детонационных волн в газозвесах унитарного топлива. Согласно рис. 2 критическое значение относительного массового содержания инертных частиц монотонно увеличивается с ростом относительного массового содержания частиц унитарного топлива.

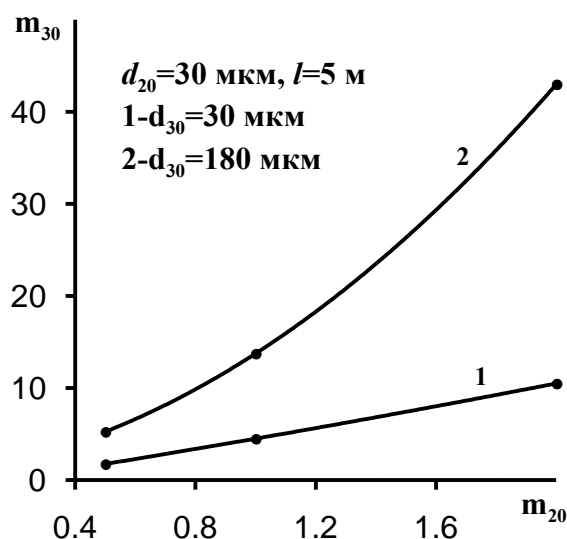


Рис. 2. Влияние начального относительного массового содержания унитарного топлива m_{20} на минимального относительного массового содержания твердых частиц m_{30} необходимого для гашения детонации

На рис. 3 приведёна результаты влияние начального относительного массового содержания унитарного топлива m_{20} ($d_{20} = 30$ мкм) на минимального относительного массового содержания твердых частиц m_{30} ($d_{30} = 180$ мкм) необходимого для гашения детонации. Кривая 1 соответствует длине экранирующих слоёв инертной фазы газозвеси $l_s = 5$ м, а 2 – $l_s = 10$ м. Видно, что минимально необходимое для прерывания детонационной волны относительное массовое содержание инертных частиц уменьшается с увеличением его слоя. Согласно рис. 3 критическое значение относительного массового содержания инертных частиц монотонно увеличивается с ростом относительного массового содержания частиц унитарного топлива.

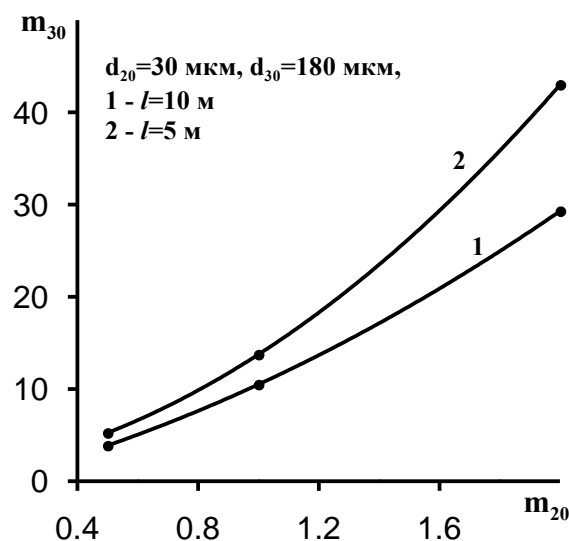


Рис. 3. Влияние начального относительного массового содержания унитарного топлива m_{20} на минимального относительного массового содержания твердых частиц m_{30} необходимого для гашения детонации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного численного исследования показывают, что размер диаметра и длины слоя твердых инертных частиц оказывает существенное влияние на процесс прерывания детонационной волны в газовзвесьях унитарного топлива.

REFERENCES

1. Кутушев А.Г. Математическое моделирование волновых процессов в аэродисперсных и порошкообразных средах. – СПб: Недра, 2003.- 284 с.
2. Кутушев А.Г., Пичугин О.Н. Численное исследование процесса прерывания распространения детонационных волн в газовзвесьях унитарного топлива слоем инертных частиц. // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29. – № 2. – С. 90–98.
3. Кутушев А.Г., Пичугин О.Н. О влиянии пространственной неоднородности распределения частиц в экранирующем слое на подавление детонационной волны в аэровзвеси унитарного топлива // ФГВ. – 1996. – Т. 32. – № 4. – С. 107–109.
4. Nazarov U.A., Interruption of Detonation Wave Propagation in Monofuel–Air Mixtures by a Layer of Inhomogeneous Inert Particles // Combustion, Explosion, and Shock Waves, – 2021. – Vol. 57, – № 6, – P. 693–703.
5. 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.
6. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987, 464 с.
7. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982.